
NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 06911495 1







Das

Buch der Erfindungen

Gewerbe und Industrien

II

Neunte, durchaus neugestaltete Auflage



Das Buch der Erfindungen Gewerbe und Industrien

Gesamtdarstellung

aller Gebiete der gewerblichen und industriellen Arbeit

sowie von Weltverkehr und Weltwirtschaft

Neunte, durchaus neugestaltete Auflage

bearbeitet von

Dr. **F. Ahrens**, Prof. für landwirtschaftliche Technologie in Breslau — **E. Arndt**, Ingenieur in Braunschweig — Dr. **H. Brüggemann** in Mülhausen i. E. — **H. W. Dahlen**, Generalsekretär des deutschen Weinbauvereins in Wiesbaden — **G. Ebe**, Architekt in Berlin — Architekt **J. Faulwasser** in Hamburg — Dr. **L. Grunmach**, Prof. a. d. techn. Hochschule in Berlin — **M. Gürtler**, Direktor der höh. Webeschule in Berlin — Direktor **Hermann Hardicke** in Remscheid — Dr. **Chr. Heinzerling** in Frankfurt a. M. — **Max Kraft**, Prof. a. d. techn. Hochschule in Graz — Prof. Dr. **Lassar-Cohn** in München — Ingenieur **H. W. Lind** in Berlin — Dr. **Richard Loewenthal**, Lehrer a. d. höh. Webeschule in Kottbus — Dr. **A. Miethe** in Braunschweig — Dr. **Joh. Päßler**, Vorstand der deutschen Versuchsanstalt für Lederindustrie in Freiberg i. S. — **Ernst Pliwa**, Direktor der k. k. Fachschule für Holzindustrie in Villach — Geheimrat Prof. **F. Reuleaux** in Berlin — **Franz Reh**, Prof. a. d. techn. Hochschule in Wien — Ingenieur **E. Rosenboom** in Kiel — **P. Rowald**, Stadtbauinspektor in Hannover — Dr. **W. Schmid**, Prof. a. d. techn. Hochschule in Aachen — **C. Schreiber** in Bockenheim — Prof. Dr. **H. Settegast**, Direktor des landwirtschaftlichen Instituts in Jena — **E. Treptow**, Prof. a. d. Bergakademie in Freiberg — **A. Wilke**, Ingenieur für Elektrotechnik in Berlin — Dr. **F. Wüst**, Lehrer a. d. Hüttenschule in Duisburg — und vielen andern Fachmännern ersten Ranges.

Zweiter Band

Die Kräfte der Natur und ihre Benutzung

Physikalische Technologie

I. Teil: Die Mechanik oder die Lehre von der Bewegung der Körper. Von Ingenieur **E. Rosenboom**.

II. Teil: Die physikalischen Erscheinungen und Kräfte, ihre Erkenntnis und Verwertung im praktischen Leben Von Professor Dr. **L. Grunmach**.

III. Teil: Die Kraftmaschinen. Von Ingenieur **E. Rosenboom**.

Mit 986 Textabbildungen, sowie 3 Beilagen



Leipzig

Verlag und Druck von Otto Spamer

1898


THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX & TILDEN
FOUNDATIONS

Inhalts-Verzeichnis
zum
Buch der Erfindungen, Gewerbe und Industrien.
Neunte Auflage.
Zweiter Band.
Die Kräfte der Natur und ihre Benutzung.

Die Mechanik oder die Lehre von der Bewegung der Körper.
Von Ingenieur E. Rosenboom.

Die Kraftmaschinen.

Von Ingenieur E. Rosenboom.

Beilagen.

Die
Kräfte der Natur und ihre Benutzung

I.

Die Mechanik
oder die Lehre von der Bewegung der Körper

von

Ingenieur E. Rosenboom



Einleitung.

Der Weise
Sucht das vertraute Gesetz in des Zufalls grausenden Wundern,
Sucht den ruhenden Pol in der Erscheinungen Flucht.
Goethe.

Die Weisesten und Besten aller Zeiten und Völker haben seit Jahrtausenden dem Urgrunde aller Dinge nachgeforscht. Hierbei haben sich von jeher zwei Wege getrennt, von zwei verschiedenen Standpunkten sind die Forscher und Denker ausgegangen.

Die empirische oder physische Betrachtungsweise faßt die Dinge in der Weise auf, wie sie sich in unserer Erkenntnis darstellen; sie sammelt Erfahrungen, durchforscht und ordnet sie und baut aus der Summe derselben das System der Naturwissenschaften im weiteren Sinne auf. Dagegen sieht die transcendentale, außerhalb des Gebietes aller Erfahrung liegende Auffassung von der Erkenntnis der Dinge, wie sie sich uns darstellen, ganz ab; sie geht vielmehr von der Betrachtung aus, daß alle Erfahrung und damit das ganze System des auf dieser aufgebauten empirischen Wissens, die Naturwissenschaften, nur auf Vorstellungen in unserem Bewußtsein beruhen. Ihre Grundfrage war deshalb von jeher, ob die Dinge in Wirklichkeit so seien, wie sie sich in unserer Erkenntnis darstellen, nämlich materiell in Raum und Zeit, oder ob sie in dieser Form nur für unser Erkenntnisvermögen vorhanden sind, welches nicht im stande ist, das Wesen der Dinge zu erfassen. Von diesem transcendentalen Standpunkte geht die Wissenschaft der Metaphysik oder Philosophie aus, deren Aufgabe es also ist, zu erforschen, was die Dinge abgelöst von ihrer Erscheinungsform für uns, von den Erfahrungen unseres Intellekts: was die Dinge an sich sind. Das einzige Erkenntnismittel für die Dinge außer uns sind unsere Sinne; durch sie tritt unser Erkenntnisvermögen erst mittelbar mit den Dingen in Verbindung. Wenn wir sagen, eine Blume sei rot, so heißt das: auf die Netzhaut unseres Auges wird durch Lichtstrahlen von gewisser Wellenlänge ein Reiz ausgeübt, der nach dem Zentralorgan, dem Gehirn, übermittelt und von diesem als das empfunden wird, was wir rote Farbe nennen. Durch die Vibrationen der Saiten oder des Metalles eines Instrumentes wird die Luft in Schwingungen versetzt, diese wirken mittels des Ohres auf die Gehörnerven, und nach der Art dieses Reizes empfinden wir die Luftschwingungen als Töne einer Geige oder eines Hornes. Ohne die besondere Einrichtung unseres Auges und Ohres, sowie unseres Nervensystems wäre für uns die Blume nicht rot, gäbe die Saite der Geige beim Streichen, das Horn beim Blasen keinen Ton; für den Blinden gibt es keine Farbe, für den Tauben keinen Ton.

Die Eigenschaften, die wir gemeinhin den Körpern zulegen, kommen also, so schließt die Philosophie, keineswegs diesen zu, sondern sie sind Vorstellungen unseres Intellekts. Da nun aber die ganze materielle, in Raum und Zeit existierende Welt nur durch solche Einwirkungen auf unser Nervensystem in Verbindung mit unserem Erkenntnisvermögen gelangt, so ist die ganze Welt, unser eigener Körper einbegriffen, nichts als unsere Vorstellung. Diese Schlüsse bilden eine logische Kette; in ihrer Konsequenz führt die metaphysische Spekulation zu der Leugnung der Realität der Körperwelt. Auch die Fundamentalbegriffe Raum, Zeit und Kausalität, die Elemente a priori der Philosophie, sind nur Begriffe der besonderen Anordnung unseres Denkvermögens. Raum können wir uns nur

mit dem Begriffe Stoff verbunden vorstellen; ohne Materie, welche Raum ausfüllt, ist letzterer ein wesenloser Schemen. Auch der Zeit kommt keine Wesenheit zu, sie ist nur ein Begriff in der Verbindung mit Bewegung, und diese ist wieder an den Stoff gebunden; ohne Bewegung gibt es keine Zeit. Sobald alle Bewegung aufhören würde, eingeschlossen unsere Lebensthätigkeit, würde auch der Begriff Zeit inhaltslos. Unsere Maße für die Zeit sind nur von regelmäßigen Bewegungen abgeleitet. In einem Jahre bewegt sich die Erde einmal um die Sonne, und in einem Tage die Erde einmal um sich selbst. Als nach der bekannten Fabel der Mönch von Heisterbach vergeblich über den Bibelspruch „dem Herrn sind tausend Jahre wie ein Tag, und ein Tag ist ihm wie tausend Jahre" nachdachte und in einen tiefen Schlaf verfiel, d. h. alle Bewegung für ihn unterbrochen wurde, war bei dem Erwachen mehr als ein Menschenalter verflossen. In anderen Weltsystemen, welche vielleicht mit intelligenten Wesen belebt sind, können von den unsrigen ganz verschiedene Zeitbegriffe herrschen. Schon in der uralten indischen Philosophie kommt die Erkenntnis hiervon in folgender Fabel zum Ausdruck. Malabhan, die Gattin des Patipudschika, steigt aus dem Himmel auf die Erde und lebt hier während eines Menschenalters; als sie nach ihrem Tode in die Welt der Götter zurückkehrt, sieht sie, daß sie nach den Zeitbegriffen dieser Welt nur wenige Stunden auf der Erde gewesen ist.

Doch kehren wir zu unserem Ausgangspunkt zurück. Wenn nach den Schlüssen der Philosophie die Körperwelt nur in unserer Vorstellung, nicht real existiert, so wollen wir versuchen, an Stelle der materiellen Dinge die Naturkräfte und Naturgesetze zu setzen; dieselben wirken unmittelbarer auf uns ein als die Körper; der Stoff kann nie direkt auf unsere Sinne wirken, sondern nur vermittelst der an ihn gebundenen Kräfte. Wenn wir also letztere begreifen können, wenn das Wesen der Naturkräfte sich unserem Erkenntnisvermögen erschließt, dann ist uns auch die Materie, mit welcher die Kräfte gebunden auftreten, näher gerückt, und wir können vielleicht auf den Begriff der Körper, der Materie, ganz verzichten. Wir würden durch die Naturkräfte alles Geschehen begreifen lernen und Genüge leisten dem unserem innersten Wesen anhaftenden Bedürfnis nach der Beantwortung der Frage „Warum?" der Ursache alles Geschehens.

Diese Naturkräfte oder schlechtweg den Begriff Kraft vermögen wir aber ebensowenig, ja selbst vom empirischen Standpunkte aus noch weniger zu erkennen. Die Naturgesetze sind nur der von den Menschen nach der Erfahrung aufgestellte und in Regeln gebrachte Ausdruck für die Wirkungen der Naturkräfte. Letztere kennen wir wieder nicht an sich, sondern nur aus ihren Folgeerscheinungen; wir sehen, fühlen, empfinden nur ihre Einwirkungen auf unsere Sinne; aus einer Anzahl solcher beobachteten Wirkungen konstruieren wir erst die Naturkräfte und deren Gesetze. Dringen wir aber tiefer, wollen wir das Wesen der Kraft ergründen, so finden wir dieses unserem Erkenntnisvermögen ebenso verschlossen, wie das Ding an sich der Philosophie. Die Mechanik gibt folgende Begriffsbestimmung: „Kraft ist die Ursache einer Bewegungsänderung eines Körpers." Diese Erklärung genügt als Grundlage für die mathematische Entwickelung der praktischen Aufgaben der Mechanik, obwohl sie auch vom rein empirischen Standpunkte aus schon nicht einwandsfrei ist; die Ursache einer Bewegung kann streng genommen stets nur wieder eine vorhergehende Bewegung sein. Dagegen ist unsere Erkenntnis durch dieselbe nicht weiter gekommen; ein unserem Denken zugänglicher Begriff ist in der Erklärung nicht enthalten.

Wir sehen fortwährend Wirkungen von Kräften, die wir gar nicht beachten, an die wir uns so sehr gewöhnt haben, daß sie uns ganz natürlich und selbstverständlich erscheinen, keiner Erklärung bedürfen und keiner näheren Untersuchung wert sind. Natürlich, in dem unwandelbaren Walten der Naturkräfte begründet, ist ja alles, selbstverständlich, klar und begreiflich aber keineswegs; im Gegenteil: alle tagtäglichen Erscheinungen sind für unsere Erkenntnis im letzten Grunde unbegreiflich. Nehmen wir das allereinfachste, nächstliegende Beispiel, welches doch das schwierigste Problem in sich schließt. Ich habe einen Stein in der Hand, öffne ich letztere, so fällt der Stein zu Boden; „ja das ist doch selbstverständlich und klar," heißt es, „denn der Stein ist schwer". Nein, es ist durchaus nicht selbstverständlich, sondern im höchsten Grade merkwürdig; wenn der Stein in der Luft schweben würde, das wäre selbstverständlich; denn woher kann ohne äußeren Anstoß ein Körper

aus der Ruhe in Bewegung übergehen? Zwischen der Erde, nach welcher sich der Stein mit einer bestimmten Geschwindigkeit hinbewegt, und dem Körper besteht doch absolut keine erkennbare Verbindung; die den Zwischenraum ausfüllende Luft verhält sich indifferent, denn auch im luftleeren Raume fällt der Stein. Wie können wir uns aber eine Einwirkung der Erde auf einen außerhalb derselben befindlichen Körper ohne jedes Verbindungsglied vorstellen? Vom rein empirischen Standpunkte aus läßt sich dieses Rätsel nicht lösen; wir müssen wieder den abstrakten Begriff „Kraft“ zu Hilfe nehmen, die Fernwirkung einer gewissen von der Erde ausgehenden Kraft annehmen, welche das Fallen des Steines bewirkt; es ist die Schwerkraft oder Gravitation. Nun haben wir wenigstens ein Wort dafür; aber auch einen Einblick in das Wesen dieser supponierten, von uns erfundenen Kraft, einen mit dem Worte verbundenen Begriff? Nein. „Wo Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein,“ sagt Mephisto im Faust.

Der Forscher erkennt, je mehr er in das Wirken der Naturkräfte eindringt und die Gesetzmäßigkeiten dieses Wirkens mehr und mehr aufdeckt, daß doch das eigentliche Wesen der Naturkräfte, der letzte Grund der Dinge uns verschlossen bleibt. Dies ist in der Begrenzung unseres menschlichen Erkenntnisvermögens fest und auf immer begründet. Diese Begrenzung unserer Erkenntnis kann sich und wird sich immer weiter hinausschieben; mit jeder neu errungenen Position wird sich uns aber ein neues Problem darbieten. Niemals kann es uns gelingen, die Beziehungen zwischen dem wesenlosen Begriff Kraft und der greifbaren Materie aufzudecken. Die Philosophie schließt seit Kant damit, daß die Körper nur die Vorstellungsform eines Dinges an sich für uns seien. Die Naturwissenschaft muß in ihren Forschungen stehen bleiben vor dem Begriffe Kraft, welcher vielleicht mit dem metaphysischen Dinge an sich identisch erachtet werden kann.

Wenn aber auch nach allem die letzten Folgerungen der naturwissenschaftlichen wie der philosophischen Forschung ins Unbegreifliche führen, wenn wir auch an der Möglichkeit verzweifeln müssen, zur objektiven Welt vorzudringen, eine logische Verbindung zwischen dem wesenlosen Begriff Kraft und der von ihr regierten Materie herzustellen, so kann der Naturforscher sich doch nicht an diesem Resultate genügen lassen; er wird sich hüten, über dem Streben nach Unerreichbarem Erreichbares zu verlieren, kann er doch unter Verzichtleistung auf die letzte Erkenntnis, indem er die Spekulationen hierüber den Philosophen überläßt, auf anderen Wegen zu den schönsten Resultaten gelangen, wie gerade die glänzende Entwickelung der exakten Wissenschaften in der letzten Hälfte unseres scheidenden Jahrhunderts zeigt.

Sehen wir von der oben dargelegten Grundlehre der Philosophie, daß die Dinge nur in unserer Vorstellung existieren, ab, bleiben wir auf dem unserem gesunden Menschenverstand genügenden und für das praktische Leben trotz aller Philosophie vollständig ausreichenden und richtigen empirischen Standpunkte, daß den Körpern Realität zukommt, daß durch unsere Sinne richtige Wahrnehmungen derselben gewonnen werden, so steht der naturwissenschaftlichen Forschung der Weg offen. In der That hat die oben entwickelte philosophische Erkenntnis, daß uns die umgebende Körperwelt nur mittelbar, durch unsere Sinne und unseren Intellekt bekannt ist, für den Ausbau der exakten Wissenschaft keinen Wert. Die Erkenntnistheorie ist eine Wissenschaft für sich, deren Ergebnisse auf die Naturforschung nicht oder nur ergänzend und mit Vorsicht, nicht aber als Grundlagen angewendet werden dürfen. Es kann uns trotz aller metaphysischen Verneinung niemals zweifelhaft sein, daß die Welt außer uns existiert, daß auf die Materie Kräfte wirken, deren Träger wiederum die Materie selbst ist. Beide sind untrennbar miteinander verbunden, wenn wir auch nicht erkennen können, wie; denn die Materie ohne Kräfte, als das nur Daseiende, würde keine Wirkungen, keine Veränderungen hervorbringen können, und den Kräften allein würde das Daseiende fehlen, an welchem ihre Äußerungen zum Ausdruck kommen.

Die Forschungsmethode der Naturwissenschaft gründet sich seit Bacon, der in seinem bahnbrechenden Werke „Novum organon scientiarum“ (London 1620) die Induktion (den Schluß vom Einzelnen aufs Ganze, vom Besonderen auf das Allgemeine) als das einzig richtige Verfahren, wie die Erfahrung als die einzige verläßliche Erkenntnisquelle dieser erwiesen hat, im Gegensatz zu der auf reiner Denkthätigkeit beruhenden Philosophie wesent-

lich auf die **Beobachtung der Erscheinungen**; wir sehen, daß, wenn zwei Körper in gewisse Verhältnisse gebracht werden, bestimmte Erscheinungen oder Veränderungen an denselben stattfinden; wir schließen, daß hierbei Kräfte in Wirksamkeit treten, und suchen so die Erscheinungen zu erklären. Zuweilen kann man sich aus den Erscheinungen ziemlich leicht den Zusammenhang zwischen der beobachteten Wirkung und ihrer Ursache herstellen, sehr häufig aber haben die physikalischen Erscheinungen einen so verwickelten Charakter, daß wir aus den beobachteten Thatsachen allein nicht direkt zu einer einleuchtenden, verständlichen Ordnung kommen können; dann ergänzen wir die Beobachtung durch gewisse Annahmen über Eigenschaften der Körper, die den Erscheinungen zu Grunde liegen, sich aber der direkten Beobachtung entziehen. Solche Annahmen können natürlich nicht willkürlich gemacht werden, sondern müssen auf Übereinstimmung zwischen ähnlichen beobachteten Thatsachen beruhen. Auf diese Weise bilden wir gewisse auf Vermutung beruhende Leitsätze (Hypothesen) betreffend den Zusammenhang einzelner Erscheinungen; aus diesen werden wieder Folgerungen gezogen und letztere unter möglichst mannigfachen Bedingungen mit den Thatsachen verglichen. Wenn schließlich die Übereinstimmung eines überwältigenden Beobachtungsmaterials an der Richtigkeit der Hypothese keinen Zweifel mehr gestattet, dann dürfen wir annehmen, daß wir eine Gesetzmäßigkeit in der Natur erkannt haben, die wir in die Form eines **Naturgesetzes** kleiden.

Freilich können wir diese nach dem angegebenen Verfahren von uns aufgestellten Naturgesetze, trotz der Sorgfältigkeit der Beobachtungen und der Vorsicht ihrer Schlußfolgerungen, nicht als unbedingt und unverrückbar feststehend, als wirklich unabänderliche ewige Gesetze der Natur betrachten. Wie viele von hervorragenden Männern früherer Zeiten aufgestellte Theorien und Gesetze sind von der späteren, besseren Erkenntnis verworfen und durch andere, wesentlich verschiedene Anschauungen ersetzt worden. Und sollen gerade die Theorien unserer jetzigen modernen Auffassung der Natur, welche sich seit noch nicht langer Zeit entwickelt haben, und die einerseits mit der Descendenztheorie an den Namen Darwins, anderseits mit dem Prinzip der Erhaltung der Energie und der hierauf aufgebauten mechanischen Wärmetheorie an die Namen Mayer, Joule, Helmholtz geknüpft sind, die letzten und endgültig richtigen sein? Wer kann dies behaupten? Wer weiß, ob nicht die jetzt lebende Generation noch von einigen hervorragenden Männern zu ganz anderen Anschauungen über die Naturerscheinungen geführt werden wird, welche die jetzt noch allgemein herrschenden so weit überragen, wie diese diejenigen der früheren Jahrhunderte?

Wenn aber auch unsere Auffassung der Naturgesetze sich ändert, die unmittelbar aus den Beobachtungen gewonnenen Schlüsse über die Gesetzmäßigkeit der Erscheinungen und Wirkungen werden hierdurch nicht entwertet; sie bleiben uns unter allen Umständen für die praktische Nutzbarmachung der Naturkräfte erhalten. Ob das Licht nach der alten Emissionstheorie ein von dem leuchtenden Körper ausgesandter unwägbarer Stoff ist oder nach der Undulationstheorie in oscillierenden Ätherschwingungen besteht — der Übergang von der einen zur anderen so grundverschiedenen Anschauung hat in der Beleuchtungstechnik, in den Erfahrungen über die Herstellung und Verwendung der Linsen, vom Fernrohre, keine Änderung bewirkt; und wenn jetzt eine neue Theorie die bisher geltende verdrängen würde, so würden die unter der Herrschaft der alten aufgestellten Regeln über die Gesetzmäßigkeiten der Wirkungen des Lichtes nicht beeinträchtigt werden.

Auf diese Weise hat die Naturwissenschaft große Gebiete von Naturvorgängen in ihren Wirkungen erkannt und unter genau definierte Gesetze geordnet. Wenn wir aber die Gesetzmäßigkeit der Erscheinungen vollkommen kennen, dann gewinnen wir auch die Macht, uns die Naturkräfte zu unterwerfen, sie nach unserem Willen und zu unserem Nutzen **dienstbar** zu machen; wir werden bis zu einem gewissen Grade die Beherrscher der Natur: ihre Kräfte, welche wir nicht zu erkennen vermögen, zwingen wir, uns in genau vorgeschriebener Weise Arbeit zu leisten. „Die echte Wissenschaft" — sagt Robert Mayer — „begnügt sich mit positiver Erkenntnis und überläßt es willig den Poeten und Naturphilosophen, die Auflösung ewiger Rätsel mit Hilfe der Phantasie zu versuchen."

Die Mechanik oder die Lehre von der Bewegung der Körper.

Aufgabe der Mechanik. Entwickelung im Altertum und Mittelalter bis zur neueren Zeit.

In der Einleitung sind im allgemeinen die Ziele der exakten Wissenschaften und die Wege zur Erreichung derselben berührt; durch Beobachtung der Erscheinungen suchen wir ihre Gesetzmäßigkeit zu erkennen und dann diese Erkenntnis nützlich zu verwenden. Die Ergründung der Naturkräfte ist Sache der reinen Wissenschaft; die von ihr gewonnenen Resultate benützt der Praktiker zur Nutzbarmachung der Naturkräfte. Wir haben uns weiterhin mit demjenigen Teile der exakten Wissenschaften zu befassen, der die Erscheinungen der auf die Körper wirkenden Kräfte der Physik im engeren Sinne behandelt, d. h. soweit sich die Zusammensetzung der kleinsten Teilchen der Materie, der Moleküle, nicht ändert. Zur Entwickelung und klaren Darstellung der Erfahrungen, Beobachtungen und Ableitungen von diesen dient die Mechanik, die Wissenschaft von der Bewegung der Körper. Man teilt sie in zwei Hauptteile, die Statik oder die Lehre vom Gleichgewichte der Körper, deren Aufgabe es ist, die Bedingungen zu untersuchen, unter denen sich mehrere Kräfte, die auf einen Körper wirken, das Gleichgewicht halten, und die Dynamik oder die Bewegungslehre, welche die Gesetze der Bewegung aufsucht, die ein Körper unter dem Einflusse von Kräften annimmt, die sich nicht das Gleichgewicht halten. Eine andere Einteilung geht aus von dem Aggregatzustande der Körper; hiernach bilden die Geostatik und Geodynamik die Mechanik der festen Körper oder die Geomechanik, ferner die Hydrostatik und Hydrodynamik die Hydromechanik oder Mechanik der flüssigen Körper und endlich die Aerostatik und Aerodynamik die Aeromechanik oder Mechanik der luftförmigen Körper. Durch die theoretische Mechanik werden auf rein mathematischem Wege die Gesetze vom Gleichgewichte und von der Bewegung der Körper entwickelt, während die angewandte Mechanik die Anwendung der mechanischen Gesetze auf Maschinen und Bauwerke umfaßt. Die Grundlagen der wissenschaftlichen Mechanik bilden wenige, auf Beobachtung und Erfahrung beruhende Grundgesetze, die sog. Prinzipien der Mechanik, welche uns zum Teil später noch beschäftigen werden.

Die Entwickelung der Mechanik ist in engem Zusammenhang mit derjenigen der Physik erfolgt, weshalb diese, soweit sie für die Mechanik von Bedeutung war, im folgenden kurz mit berührt werden soll.

Praktisch war die Mechanik schon im grauen Altertum bei den Kulturvölkern in Anwendung. Die Ägypter haben schon eine beträchtliche praktische Kenntnis derselben gehabt; das Heranschaffen und Heben so ungeheuerer Lasten, wie sie für ihre großartigen Bauwerke, deren Reste noch heute unsere Bewunderung erwecken, gebraucht wurden, sind für jene Zeit ganz ungeheure Leistungen. Sie kannten den Flaschenzug und vieles andere. Die Babylonier und Ägypter besaßen schon ein vollständig ausgebildetes Maß- und Gewichtssystem, welches sich später über die ganze Welt verbreitete und hierdurch im Weltverkehr Vorteile bot, welche wir uns bis jetzt noch nicht wieder haben erringen können.

Auch die Zeit war bereits in sehr genauer Weise eingeteilt, auf denselben Grundlagen, die wir noch heute haben. Als Wissenschaft wurde indessen die Mechanik erst viel später ausgebildet.

Bei den in der Kultur im ganzen so hochstehenden Griechen, die ihre Wissenschaft zum Teil von den vorgenannten Völkern übernommen haben, indem die bedeutendsten Männer ihre wissenschaftliche Bildung in Ägypten erhielten oder vervollständigten, herrschte weniger Sinn für die Naturwissenschaften in unserem Sinne; bei ihnen herrschte das Interesse für die bildenden Künste, die Politik und Volkswirtschaft und besonders die Philosophie vor. Die Physik und Mechanik bildete einen Teil der letzteren und wurde wie diese in vorwiegend spekulativer Weise behandelt. Da aber Physik und Mechanik, wie überhaupt die Naturwissenschaft, unbedingt auf Beobachtung und Experiment angewiesen sind, also vorzugsweise empirisch behandelt werden müßten, so hat die griechische Naturphilosophie im ganzen die Erkenntnis der Naturgesetze und besonders die Entwickelung der Physik und Mechanik eher gehemmt als gefördert.

Von den wenigen hervorragenden Männern, die sich auch mit dem physikalischen und mechanischen Problem beschäftigten, ist zu nennen der Agrigentiner Empedokles; derselbe stellte, zum Teil wohl vom Morgenlande her beeinflußt, gegen 460 v. Chr. die Lehre von den unvergänglichen und ewigen vier Grundstoffen Erde, Wasser, Luft und Feuer auf — welche lange Zeit als die „vier Elemente“ ihren Platz in der Naturwissenschaft behauptet haben; aus ihnen sollten durch anziehende oder abstoßende Kräfte, die „treibende Liebe“, die Verbindung und Trennung bewirkt und alle Dinge gebildet werden. Bei Demokrit von Abdera (470 — 362 v. Chr.) und Anaxagoras (500 — 428) dagegen finden wir schon die Keime für Vorstellungen, die noch heute unseren Theorien zu Grunde liegen. Sie lehrten, daß die Menge alles Seienden unveränderlich sei und nur die Erscheinung oder Form sich ändere; sie betrachteten bereits die Körper als aus kleinsten Teilchen, den Atomen, bestehend, welche das Ursprüngliche, Wirkliche seien, und die nach Demokrit im Stoffe gleichartig und nur durch verschiedene Lagerung, Größe, Gestalt die verschiedenartigen Körper bilden. Hier haben wir also schon die Lehre von der Unzerstörbarkeit des Stoffes. Später aber trennte sich die Philosophie immer mehr von den Wegen der exakten Naturwissenschaft; der Wert der Beobachtung wurde vernachlässigt, aus einer geistreichen Idee wurde auf rein spekulativem Wege mit vielem Aufwand an Witz und Dialektik ein neues System begründet. Der große Philosoph Platon stellte den von seinem Lehrer Sokrates gebildeten Begriff eines Dinges an sich, die Vorstellung desselben als das allein wirklich Seiende auf und wurde so der Urheber der philosophischen Betrachtungen, die wir bereits in der Einleitung dargestellt haben, und welche die Ursache des bis in unsere Zeit dauernden Gegensatzes zwischen Philosophie und Naturwissenschaft geworden ist. Den größten Einfluß auf die Entwickelung der ganzen Naturwissenschaft hat aber Aristoteles (384—322) gehabt. Derselbe wurde der Begründer einer Naturphilosophie, die fast zwei Jahrtausende lang herrschend wurde und im Mittelalter vereint mit der kirchlichen Dogmatik als scholastische Wissenschaft lange das Aufblühen einer wirklichen Naturwissenschaft im modernen Sinne niedergehalten hat. Aristoteles hat zwar auch auf dem Wege der empirischen Forschung Erfolge in der Naturwissenschaft gehabt; der Schwerpunkt seiner Forschungen liegt aber in der spekulativen philosophischen Behandlung der Naturwissenschaft. Hierdurch gelangte er in den Versuchen, die Erscheinungen zu erklären, nur auf dunkle, abstrakte Begriffe; trotzdem galten seine Lehren noch im Mittelalter als die unumstößlichen Grundlagen der Naturwissenschaft. Wir haben bis zu dieser Zeit im klassischen Altertum zwar eine große Anzahl naturphilosophischer Systeme, dagegen keine klaren physikalischen Begriffe oder durchgearbeitete Theorien.

Nach Aristoteles' Tode erst und nach der Unterwerfung Griechenlands durch Alexander begann mit dem Ende des Fortschreitens der rein philosophischen Wissenschaft ein Aufschwung der Naturwissenschaft, indem die Nachfolger der großen Philosophen sich der Einzelforschung zuwandten und Beobachtung und Versuch zur Anwendung brachten; der Ausspruch des Eudoxos, daß auf dem Gebiete der Naturkunde die Erfahrung die

einzige Quelle der Erkenntnis sei, gewann an Geltung. Der eigentliche Begründer der Mechanik wurde Archimedes von Syrakus (287—212), ein Mann, der stets in den Reihen der ersten Mathematiker und Erfinder genannt werden wird. Er entwickelte unter anderm die Theorie der einfachen Maschinen (die wir weiterhin noch eingehend besprechen werden) und die Lehre vom Schwerpunkte, entdeckte den Auftrieb von Flüssigkeiten und wußte seine Theorien praktisch zur Anwendung zu bringen; vierzig neue Erfindungen wurden ihm von seinen Zeitgenossen zugeschrieben, denen dieselben zum großen Teil unverständlich waren.

Archimedes hatte bereits eine klare Vorstellung von den mechanischen Vorgängen und dem Wirken der Kräfte; trotz dem hiermit gemachten ersten Schritt zu einer wirklichen Naturwissenschaft fanden sich beinahe zwei Jahrtausende hindurch keine Nachfolger, welche auf dem richtigen Wege dieser Methode weiterdrangen. Man hielt streng an den unbestimmten Vorstellungen des Aristoteles fest, daß die Körper den Grund der Ruhe und Bewegung in sich selbst hätten; den Gedanken, daß die Ursachen der Bewegung in Kräften zu suchen seien, baute keiner aus.

Zur Zeit des Archimedes wurde zu Alexandrien mit großartigen Mitteln eine Bibliothek, das alexandrinische Museum gegründet, welches für mehrere Jahrhunderte ein Hauptsitz der Wissenschaft wurde; in der Blüte stand dasselbe um und nach 100 v. Chr. Unter den alexandrinischen Gelehrten erwarben sich hauptsächlich Ktesibios und sein Schüler Heron (um 100 v. Chr.) Verdienste um die Mechanik; letzterer führte alle mechanischen Vorrichtungen auf die Hebelgesetze zurück und konstruierte verschiedene aus Hebeln und Zahnrädern zusammengesetzte Maschinen; vom Heronsbrunnen sprechen wir noch heute. Der letzte der bedeutenderen Alexandriner war Ptolemaios, der außer bedeutsamen astronomischen und geographischen Leistungen auch physikalische Arbeiten hinterlassen hat.

Mit Ptolemaios ist die Reihe der griechischen Gelehrten, die uns wichtigere naturwissenschaftliche Arbeiten hinterlassen haben, geschlossen. Die Weiterentwickelung der Physik und Mechanik ruhte hierauf fast ganz bis gegen das Ende des 16. Jahrhunderts. Die Römer entnahmen mit der übrigen höheren Kultur auch ihre Naturkenntnis von den Griechen; eine bedeutsame Fortentwickelung derselben fand bei ihnen nicht statt, und besonders in der Physik und Mechanik haben sie keine selbständigen Leistungen aufzuweisen. Dagegen sind mehrere römische Schriftsteller für die Naturwissenschaft dadurch wichtig geworden, daß sie in ausführlicher Weise die Kenntnisse ihrer Zeit, und besonders auch den Inhalt der früheren griechischen Naturlehre zusammengestellt haben. Hier sind zu nennen Lucretius, ein Zeitgenosse des Augustus, der einige Jahrzehnte vor Christi Geburt in vollendeter Darstellung die Lehren Demokrits und Epikurs aufzeichnete, und Plinius der Ältere, der Verfasser eines überaus reichhaltigen und wichtigen Sammelwerkes, der als Opfer seiner Wißbegier bei der Beobachtung des Ausbruchs des Vesuvs im Jahr 79 erstickte. In einem Lehrgedichte von Lukrez „De rerum natura“, „Von der Natur der Dinge“, findet sich die Stelle:

„Drum auch ist die Bewegung, in welcher die Körper des Urstoffs
Jetzt sich befinden, darin schon längst vorhanden gewesen,
Und wird ferner noch statthaben auf ähnliche Weise.
Keine Gewalt ist fähig, die Summe der Dinge zu ändern.
Wo wäre etwas, wohin auch nur ein Teilchen des Urstoffs
Könnt' aus dem All entfliehen? Wo könnten auch wieder die neuen
Kräfte sich bilden, zu dringen ins All und zu ändern der Dinge
Ganze Natur und deren Bewegung?“

(Freie Übertragung nach J. Weyrauch.)

Lukrez nahm also außer der Unveränderbarkeit der Materie auch die Unzerstörbarkeit der Bewegung an; es mochte dies allerdings nur ein dunkles Vorgefühl sein, zu einer klareren Erkenntnis oder Formulierung dieses Gedankens in einem Gesetze ist er nicht und in fast zwei Jahrtausenden nach ihm keiner gelangt.

Mit dem Ende der griechischen Kultur und des römischen Weltreiches ging in den Umwälzungen der großen Völkerbewegungen alle Wissenschaft zu Grunde; besonders die

physikalischen und mechanischen Kenntnisse gingen fast ganz verloren. Erst im Mittelalter wurde die Naturforschung wieder aufgenommen und zwar vorzugsweise von Deutschen. Inzwischen hatte eine verhältnismäßig kurze Zeit der Kultur bei den Arabern geblüht, die sich nach der Eroberung Alexandriens alsbald die höheren alten Kulturerrungenschaften der Griechen und Römer angeeignet hatten. Von den Arabern wurde der sich neu entwickelnden deutschen Wissenschaft zum Teil die klassische griechische Litteratur übermittelt, besonders die Schriften des Aristoteles, freilich nicht zum Vorteil der Naturforschung; denn mit ihrer Hilfe wurde damals das starre System der scholastischen Philosophie gebildet, welches bald alle Forschung, die mit diesem nicht vereinbar war, ausschloß. Die Scholastik hing in der ganzen Denkweise und Behandlung aller, sowohl philosophischer wie rein naturwissenschaftlicher Fragen und Probleme vollständig von der doppelten Autorität der Kirchenlehre und des Aristoteles ab und bildete, anstatt neue Gedanken hervorzubringen oder neue Wege der Erkenntnis zu beschreiten oder wenigstens zu suchen, besonders in der Naturwissenschaft, nur eine spitzfindige, haarspaltende Dialektik aus. Unter dem geistigen Drucke dieser Herrschaft wurde nicht nur eigene neue Forschung niedergehalten, sondern es ging auch das Verständnis der aus dem Altertum herübergeretteten Wahrheiten der Naturwissenschaft verloren. Die Unduldsamkeit der scholastischen Lehre ging so weit, daß es gefährlich wurde, außerhalb des fest umschlossenen Ringes ihres Systems Forschungen zu betreiben; da die Kirche sich eine Zeitlang mehr und mehr mit dieser Lehre identifizierte, so mußte der Forscher befürchten, für seine abweichenden Lehren zum Ketzer gestempelt und von der Inquisition bedroht zu werden. Die Universitäten, deren im 13. und 14. Jahrhundert mehrere in Italien, Frankreich und Deutschland gegründet wurden, vermochten die Fesseln, welche die Scholastik der freien Forschung angelegt hatte, nicht zu sprengen, da die Lehrer an denselben fast ausnahmslos den Mönchsorden angehörten und ihre Schüler nur im scholastischen Sinne lehrten. Aber trotz alledem ließ sich die Naturforschung nicht auf die Dauer niederhalten. Eine Zeitlang irrte sie noch auf falschen Wegen umher, mit unbestimmten mystischen Erklärungsversuchen, die teilweise noch aus der griechischen Naturphilosophie stammten. Man nahm übernatürliche Kräfte, verborgene, geheimnisvolle Eigenschaften der Körper an, ja ließ letztere von besonderen Geistern bewohnt sein, um die Erscheinungen zu erklären. Aus dieser für die Naturwissenschaft trostlosen Epoche ragen einige Männer hervor, die der Erwähnung wert sind. Johannes Müller, der sich nach seinem Geburtsort Königsberg in Franken den Beinamen Regiomontanus gegeben hat, unter dem er bekannt wurde, hat im 15. Jahrhundert die Dezimalrechnung erfunden, parabolische Brennspiegel hergestellt, die Schiefe der Ekliptik beobachtet und besonders durch seine Forschungen großen Einfluß auf Kopernikus ausgeübt. Er wurde auch vom Papste Sixtus IV. nach Rom berufen, um die Reform des Julianischen Kalenders durchzuführen, zu welcher der Kardinal Nicolaus de Cusa die Anregung gegeben hatte. Dieser Kirchenfürst und Gelehrte hatte ebenfalls den Kreis der scholastischen Lehre überschritten;



1. **Johannes Müller aus Königsberg in Franken, gen. Regiomontanus.**

er griff die herrschende Annahme des Aristoteles von einer ruhenden Erde an und stellte, allerdings auch von falschen Voraussetzungen seiner Bewegungslehre ausgehend, die Rotation der Erde um ihre Achse auf. Er sah ein, daß die Bestimmung des Konzils von Nicäa im Jahre 325, durch welche die Frühlings-Tag- und Nachtgleiche auf den 21. März festgesetzt wurde, sich mit dem damals geltenden Julianischen Kalender auf die Dauer unmöglich in Einklang bringen ließ. Die Durchführung der schon beschlossenen Kalenderreform wurde aber infolge des plötzlichen Todes des Regiomontanus doch nicht ausgeführt.

Seiner Zeit weit voraus war der als Maler und Bildhauer heute allgemein, als Physiker dagegen weniger bekannte Leonardo da Vinci (1452—1519). Seine wissenschaftlichen Arbeiten kamen leider zu seiner Zeit nicht zur Anerkennung, sonst würden sie eine gänzlich andere Entwickelung der Physik bewirkt haben. Seine Errungenschaften mußten später von Galilei ganz von neuem nochmals erworben werden, so wenig waren sie beachtet worden. Er hatte bereits über die Wirkungsweise der Maschinen Ansichten, die mit Einschränkungen heute noch gelten; er untersuchte mit Erfolg die Reibung, das Verhalten von Flüssigkeiten in kommunizierenden Röhren, die Kapillarität, und konstruierte manche sinnreiche Maschine. Erst nach hundert Jahren kam die Wissenschaft wieder auf dem Punkte an, den Leonardo bereits erreicht hatte.

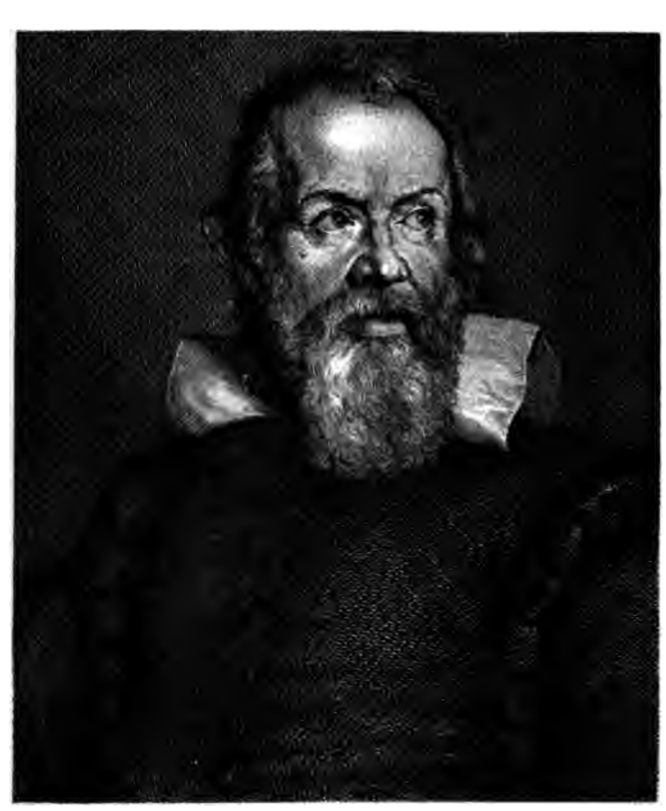


2. Nikolaus Kopernikus.

In der Mitte des 16. Jahrhunderts (1543) erschien das bedeutsame Werk des Deutschen Kopernikus, nachdem dieser lange gezögert hatte, dasselbe zu veröffentlichen, da seine neue Lehre von der Bewegung der Himmelskörper, wonach sich nicht das ganze Weltsystem um die Erde bewegt, sondern diese wie alle Planeten um die Sonne, in zu schroffem Gegensatze gegen die als unantastbar geltenden alten Anschauungen stand. Dieses Werk wurde zwar anfangs nur wenig beachtet, führte aber doch schließlich zum Sturze der ganzen Lehre des Aristoteles und der scholastischen Wissenschaft. Einen Fortschritt in der Bewegungslehre brachten die Arbeiten des Mathematikers des Herzogs von Savoyen, Benedetti, welcher zuerst die Bewegung durch stetig wirkende Ursachen erklärte und den Satz aufstellte, daß ein bewegter Körper in gerader Linie sich fortzubewegen bestrebt sei; hiermit durchbrach er die alte Anschauung, daß die Kreisbewegung die ursprüngliche und natürliche sei, welche bis dahin der Naturphilosophie und Astronomie zu Grunde gelegen hatte.

Mit dem Schlusse des 16. Jahrhunderts begann endlich durch Galilei, den größten Naturforscher Italiens, eine neue Epoche, in welcher eine genaue und sichere Fortsetzung auf dem Gebiete der Physik und Mechanik auf Grund genauer Beobachtung und daraus zu ziehender klarer Schlüsse an die Stelle althergebrachter, unbestimmter Begriffe trat.

Galilei studierte auf der Universität Pisa Mathematik und Naturwissenschaft, letztere natürlich auf des Aristoteles Grundlage; diese Lehre konnte ihn aber nicht befriedigen, und er trat bald in Gegensatz zu ihr. Er wurde Professor an der Universität Padua, wo er 18 Jahre lang wirkte; dies war die Zeit seines erfolgreichsten Schaffens: er fand vielseitige Anerkennung und wurde bald berühmt. Galilei verarbeitete das von seinen Vorgängern überkommene Material von neuen Gesichtspunkten aus und kam so auf seine neuen, anfangs von allen Seiten angegriffenen Lehren. Aber auch er wußte sich noch nicht überall ganz frei von den scholastischen Ideen zu machen, in seinen Werken steht häufig altes neben neuem, und seine Resultate sind keineswegs alle einwandfrei. Er kam bei seinen frühesten Arbeiten auf das Gesetz der Trägheit, wobei er von den Arbeiten Benedettis ausging, erkannte es jedoch noch nicht in seiner vollen Ausdehnung und Gültigkeit für jede Bewegung; er schuf die wissenschaftlichen Lehren von der Bewegung, die Dynamik; durch seine Arbeiten über die Fall- und Wurfbewegung kam er auf das höchst wichtige Parallelogramm der Kräfte. Weiterhin entdeckte er die Pendelgesetze und konstruierte hiernach die erste Pendeluhr; er erfand das Fernrohr (doch ist die Geschichte dieser Erfindung nicht klar geworden, und Galilei scheint nicht der erste oder alleinige Erfinder zu sein) und machte mit Hilfe desselben viele astronomische Entdeckungen, welche alle die Richtigkeit des Systems des Kopernikus bewiesen, so daß Galilei für dasselbe eintrat und es zur Anerkennung bringen wollte. Hiermit aber kam er in zu starken Konflikt mit der scholastischen Lehre, den Jesuiten und der heiligen Kongregation in Rom. Nachdem er bereits viel Ruhm und hohe Ehrenbezeugungen geerntet und sich auch die Gunst hochgestellter Kirchenfürsten erworben hatte, wurde er doch später als 70jähriger Greis vor den Richterstuhl der Inquisition geladen und mußte, um nicht der drohenden äußersten Verfolgung ausgesetzt zu sein, sich herbeilassen, sich scheinbar zu unterwerfen und seine Lehre zu widerrufen. Wenige Jahre später starb er, 1642, nachdem er die letzten Lebensjahre schon erblindet war.


8. Galileo Galilei.

Neben Galilei ragte in derselben Zeit ein ebenbürtiger Geist, Johannes Kepler (geb. 1571 zu Weil der Stadt in Württemberg, gest. 1630), hervor, der auf dem Wege und in der Methode Galileis forschte und zwar vorzugsweise auf dem Gebiete der Mathematik, Astronomie und Optik. Sein unvergängliches Verdienst ist die Entdeckung der Gesetze der Planetenbewegung. Ferner ist hervorzuheben der Italiener Evangelista Torricelli (geb. 1608, gest. 1647 zu Florenz), welcher die Gesetze vom Ausfluß der

Flüssigkeiten aus Gefäßen erforschte, 1643 das Barometer erfand und die unregelmäßigen Schwankungen desselben erkannte, auch zuerst einfache Mikroskope verfertigte und die Fernrohre verbesserte.

Galilei war einer der wenigen umfassenden großen Geister, welche das ganze Gebiet der Naturwissenschaften beherrschten, und als deren letzter in unserer Zeit Humboldt gelten kann; er hatte für die Nachwelt nach den verschiedensten Richtungen der Forschung die Wege geebnet, neue Bahnen eröffnet; aber kein Nachfolger fand sich, der die Gesamtheit seiner Werke weiterzuführen im stande gewesen wäre; vielmehr wurden dieselben getrennt und einzeln von einer Anzahl Gelehrten aufgenommen und fortgesetzt, von denen besonders René Descartes (Cartesius) die mathematische Behandlung der Probleme der Physik, also die eigentliche Mechanik, ausbildete; die wichtigeren Erfindungen anderer sollen in den weiteren Kapiteln näher besprochen werden.

Der folgende Abschnitt in der Entwickelung der Physik und Mechanik ist durch die drei Namen Huyghens, Newton und Leibniz bezeichnet, deren Wirken zusammengefaßt demjenigen Galileis zu vergleichen ist. Mit ihnen ist eigentlich die moderne Physik und Mechanik eingeleitet, welche auf ihren Arbeiten aufgebaut wurde, und deren stolzer Bau in unserer Zeit durch das Prinzip der Erhaltung der Energie und die mechanische Wärmetheorie gekrönt wurde. Ihre, sowie die späteren Erfindungen und Entdeckungen haben nicht mehr bloß geschichtliches Interesse, sondern bilden noch bedeutsame Bestandteile unserer heutigen Mechanik; sie sollen eingehender in den folgenden Abschnitten an geeigneter Stelle besprochen werden.

Die Grundbegriffe der Mechanik.

Raum, Zeit, Bewegung. Die Materie und ihre Eigenschaften; Undurchdringlichkeit; Teilbarkeit; Porosität; Filter; Kohäsion; Festigkeit und Elastizität; Adhäsion. Aggregatzustände. Trägheit und Kraft; Schwere und Masse. Die Energie; Arbeit; Arbeitsleistung. Satz von der Erhaltung der Energie. Perpetuum mobile. Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.

Raum ist zwar ein sehr geläufiger, scheinbar selbstverständlicher, aber für tiefer dringende Forschung äußerst schwieriger Begriff, dessen nähere Bestimmung zu den bisher ungelösten und wahrscheinlich unlösbaren metaphysischen Problemen gehört. Eine klare und genügende Erklärung des Begriffes Raum gibt es auch im physikalischen oder mechanischen Sinne nicht; eine solche ist aber überflüssig, da der Raum die allgemeine Form unserer Vorstellung der Körperwelt und im praktischen Sinne in der That selbstverständlich ist. (In der Philosophie Kants bilden Raum und Zeit, außer der Kausalität die Dinge a priori, d. h. sie sind vor aller Erfahrung angeborene Funktionen unseres Intellektes.) Die Mechanik und ihre Hilfswissenschaft, die Geometrie oder Raummessung, nehmen den Raum als gegebenen Begriff mit den Eigenschaften der Unendlichkeit und der drei Dimensionen. Die Unendlichkeit des Raumes ist zwar von Philosophen bestritten worden, aber eine einfache Erwägung macht dieselbe einleuchtend; wenn der Raum nicht unendlich ist, dann muß er irgendwo, und sei es in noch so großer Weltenferne, eine Begrenzung haben; was ist aber dann hinter dieser Grenze? das Nichts? Ein Nichts gibt es nicht, ist uns nicht vorstellbar; also ist noch Raum da, und der Raum ist unendlich. Auch daß der Raum drei Dimensionen hat, d. h. daß sich alle die Richtungen seiner Ausdehnung auf drei zu einander rechtwinkelig stehenden Hauptrichtungen — Länge, Breite und Dicke oder Höhe oder Tiefe — zurückführen läßt, ist ohne weiteres einleuchtend.

Zur Messung von Raumgrößen dienen die räumlichen Maßeinheiten, indem man, wie bei jedem Messen, die Größe eines Raumes mit einer anderen bekannten Größe gleicher Art, einer räumlichen Maßeinheit, vergleicht. Die Grundlage der Raummessung ist das Längenmaß; mit einer Längeneinheit mißt man direkt in einer Richtung Längen. Durch Verbindung der Längenmessung in zwei und drei Richtungen erhält man die Flächen- und Körpermaße. Die ältesten Einheiten für Längenmaße waren Teilen des menschlichen Körpers entnommen; aber es zeigte sich schon sehr früh, mit der Entwickelung

von gewerblicher Thätigkeit und Verkehr, das Bedürfnis nach feststehenden, unveränderlichen Maßeinheiten. Dieselben konnten nur aus unveränderlichen Größen der Natur entnommen werden; es hat aber sehr bedeutende Schwierigkeiten gemacht, solche zu finden und genau zu bestimmen. Die deutsche geographische Meile stellte den fünfzehnten Teil eines Grades des Äquators dar. Doch erst in neuerer Zeit haben wir mit dem **metrischen Maßsystem** wieder eine aus der Natur entnommene, unveränderliche und sehr genau festgestellte Längeneinheit gewonnen. Im Jahre 1791 schlug die von der Pariser Akademie der Wissenschaften gebildete Kommission den zehnmillionten Teil des Erdquadranten (Länge eines Erdmeridians vom Pol bis zum Äquator) als Längeneinheit vor. Dies wurde angenommen; das Maß wurde durch sehr sorgfältige und umfangreiche Messungen direkt bestimmt und bildet jetzt als das **Meter** die Einheit des sogenannten metrischen Maßsystems. Näheres über Messen und Maßeinheiten sowie die geschichtliche Entwickelung derselben bringt das Einleitungskapitel des zweiten Abschnitts dieses Bandes: „Maß und Messen“.

Wie der Raum das Nebeneinander des Stoffes, so bestimmt die **Zeit** das Nacheinander von Begebnissen. Die Zeit ist an den Begriff der Bewegung gebunden; ohne diese wird sie wesenlos, wie bereits in der Einleitung dargelegt wurde. Aristoteles nannte die Zeit das Maß der Bewegungen im Weltall.

Für die Beobachtung aller Bewegungserscheinungen sind gleichzeitige **Zeitmessungen** notwendig; da aber die Zeit an sich ein abstrakter, der direkten Beobachtung und Messung nicht zugänglicher Begriff ist, so müssen wir ihre Messung, d. i. die Vergleichung der Dauer von Zeitabschnitten auf die Bewegung von Körpern zurückführen. Zur Ableitung eines Zeitmaßes, einer meßbaren, stets reproduzierbaren Zeiteinheit brauchen wir einen Körper, der eine bestimmte Bewegung jederzeit genau wiederholt. Schon im frühesten Altertum hat sich das Bedürfnis nach einem System der Zeitmessung geltend gemacht; der ersten Zeitmessung wurde die einzige damals bekannte regelmäßige Bewegung, diejenige (scheinbare) der Himmelskörper, insbesondere der Sonne und des Mondes um die Erde, zu Grunde gelegt, auf welchem auch heute noch unsere Zeitmessung beruht. Die Babylonier und Ägypter rechneten den Tag vom Aufgang bis zum Untergang der Sonne und teilten Tag und Nacht in je 12 Stunden. Je nach der Jahreszeit waren also die Tagesstunden und Nachtstunden verschieden lang. Das Jahr bestimmten sie ebenfalls nach der Sonne, und es war ihnen bereits die für den Entwurf richtiger Kalendertafeln wichtige Periode von 19 Sonnenjahren bekannt, in welche fast genau 235 Mondwechsel fallen. Der bürgerliche Tag begann bei den Babyloniern mit Sonnenaufgang, bei den Juden, den alten Athenern, den Persern und auch den Chinesen dagegen mit dem Untergange der Sonne.

Für die Einteilung des Tages in kleinere Zeitabschnitte, welche naturgemäß ein Bedürfnis war, fehlte ein direkter äußerer Anhalt; woher für die Stundenzählung die Einteilung in 12 bezw. 24 Teile abgeleitet ist, ist nicht so leicht erklärlich, da doch seit den ältesten Zeiten unser ganzes Zahlen- und Rechnungswesen auf der Grundzahl 10 beruht. Nachgewiesen ist es, daß diese Stundeneinteilung uralt ist, von den Babyloniern zu den Ägyptern und den Griechen übergegangen ist und von diesen sich bei den Römern und über die ganze abendländische Kultur verbreitet hat. Für die Messung kleinerer Zeitabschnitte erfand man die ersten Zeitmesser, die Sonnen-, Wasser- und Sanduhren, von denen die ersteren sehr lange Zeit allgemein angewendet wurden und die letzteren noch jetzt für besondere Zwecke (Eieruhren) in Gebrauch sind. Das Prinzip der Sonnenuhren besteht darin, daß ein dünner Stab inmitten eines Kreises steht, der am Umfang so eingeteilt und bezeichnet ist, daß mit der fortschreitenden Sonne der Schatten des Stabes die Stunden anzeigt.

Auch unsere jetzige Zeitmessung beruht noch auf der Drehung der Erde um ihre Achse und um die Sonne. Die Zeit zwischen zwei Kulminationen (höchster Stand der Sonne mittags) ergibt einen Sonnentag, und die Zeit der Vollendung eines Umlaufes der Erde um die Sonne ein Jahr. Aus der Einteilung des Tages von Sonnenaufgang bis Niedergang in 12 Stunden ergab sich von selbst die spätere Einteilung eines ganzen Tages, von einem Sonnenaufgang bis zum nächsten, in 24 Stunden, und durch die

genaueren Zeitmesser (Uhren) kam man zu 24 gleichlangen Stunden, unabhängig von der Zeitdauer zwischen Morgen und Abend*).

Das Bedürfnis nach kleineren Zeitmaßen ergab die Einteilung der Stunde in Minuten und Sekunden. Genaue Zeitmessungen wurden erst durch die später noch zu besprechende Erfindung der Pendeluhr durch Huyghens 1656 ermöglicht. Für praktische Zeitmessung dienen heute nur noch diese sowie die Federuhren; andere Gattungen von Uhren, wie Sonnenuhren, Wasseruhren, Sanduhren kommen in der Mechanik nicht in Betracht. Uhren von besonders genauem Gang, die auch zur Messung sehr kleiner Zeitintervalle geeignet sind, heißen Chronoskope, Chronometer oder Chronographen. Die Vervollkommnung derselben ist in neuerer Zeit so weit gediehen, daß man mit Chronoskopen für wissenschaftliche Zwecke $^1/_{10000}$ Sekunde messen kann. Weiteres über Apparate zur Zeitmessung findet sich in dem Einleitungskapitel des zweiten Abschnittes dieses Bandes.

Die Messung von Zeitdauern mit den üblichen Uhren reicht für die vollständige Bestimmung der Zeit nicht aus; häufig muß auch der sogenannte absolute Zeitpunkt, d. h. die Zeit in einem bestimmten Augenblick, festgestellt werden. Die Angaben aller Uhren, auch der genauesten, bedürfen in dieser Beziehung einer häufigen und regelmäßigen Kontrolle, da ein wirklich absolutes Genaugehen auch der besten, einmal richtig eingestellten Uhr für längere Zeit unmöglich ist. Zu diesem Zweck wird an vielen Stellen regelmäßig jeden Tag durch astronomische Beobachtung der genaue Mittag festgestellt, vorzugsweise auf den Sternwarten. Vielfach, besonders in den wichtigeren Häfen, ist die Einrichtung getroffen, daß genau um 12 Uhr mittags an einer frei stehenden, weithin sichtbaren Stelle ein sogenannter Zeitball fallen gelassen oder auch auf einer Station ein Kanonenschuß, der Mittagsschuß, abgegeben wird; hiernach können die Uhren regelmäßig berichtigt werden.

Für die Zeiteinteilung hatten die Römer das etruskische Jahr zu 10 Monaten oder 304 Tagen; nach der Überlieferung soll es Numa Pompilius gewesen sein, der an dessen Stelle einen Kalender einführte, nach dem das Jahr 355 Tage in 12 Monaten hatte. Da diese Zeit mit dem wirklichen Jahre bei weitem nicht übereinstimmte, wurde von Zeit zu Zeit ein dreizehnter Monat als Schaltmonat hinzugefügt. Der erste, ziemlich genau berechnete, allgemein zur Anwendung gelangte Kalender ist der Julianische, der von Julius Cäsar 46 v. Chr. eingeführt wurde. Nach demselben hatte das Jahr 365 Tage; um den Unterschied zwischen dieser Zeit und der wirklichen Umlaufszeit der Erde um die Sonne (damals hatte man die entgegengesetzte Vorstellung) auszugleichen, erhielt jedes vierte Jahr als Schaltjahr 366 Tage. Hiermit wurden aber alle vier Jahre 44 Minuten 56 Sekunden, oder fast $^3/_4$ Stunden zu viel gerechnet; dies macht in rund 130 Jahren einen Tag, ein Fehler, welcher sich durch die Jahrhunderte fortsetzte und stetig größer wurde. Man erkannte dies im 15. Jahrhundert, aber der Beschluß des Papstes Sixtus IV. eine Kalenderreform zu veranstalten, kam durch den Tod des hierzu berufenen Regiomontanus (s. Einleitung) nicht zur Ausführung. Erst gegen 100 Jahre später berechnete der Mathematiker Professor Reinhold zu Wittenberg im Auftrage des Herzogs Albrecht von Preußen neue astronomische Zeittafeln. Dieselben wurden der vom Papste Gregor XIII. im Jahre 1582 durchgeführten Kalenderreform zu Grunde gelegt; hiernach fallen alle vier Jahrhunderte drei Schaltjahre aus; der Papst ordnete für die ganze Christenheit die Einführung des neuen Kalenders an, welcher zur Ausgleichung des aus dem Julianischen Kalender im Laufe der Jahr-

*) In neuester Zeit ist mehrfach angestrebt worden, anstatt der doppelten Zählung von 1 bis 12 die Stunden des Tages durchlaufend von 1 bis 24 zu zählen; dies hat zweifellos manche Vorteile, indem Unklarheiten, ob bei einer Zeitbezeichnung die Tages- oder Nachtstunde gemeint ist, ausgeschlossen werden. In der Astronomie ist die Zählung der Stunden von 1 bis 24 schon üblich und zwar beginnend mit Mittag; in Britisch-Indien ist im Eisenbahnverkehr die 24-Stundenzählung schon seit 30 Jahren eingeführt, und im Gangesthale wird dieselbe auch im bürgerlichen Leben angewandt. In Europa ist die neue Stundenzählung seit längerer Zeit im Telegraphendienst und seit 1893 auch im Eisenbahndienst eingeführt, und seit Sommer 1897 ist auch Belgien im Eisenbahndienst zur 24-Stundenzählung übergegangen. Für unser tägliches Leben wird indes diese neue Bezeichnung wohl so bald nicht eingeführt werden; wenn auch die bisherige Einteilung nur den einen Vorzug ihres ehrwürdigen Alters von etwa 4000 Jahren hat, so sind doch die Vorzüge der neuen Bezeichnung nicht so groß, daß der allgemeine Übergang zu derselben geboten wäre.

hunderte entstandenen Fehlers damit begonnen wurde, daß die Tage vom 5. bis 14. Oktober in diesem Jahre gestrichen wurden. Die meisten protestantischen Fürsten kehrten sich jedoch lange Zeit nicht an diese päpstliche Verfügung; erst über hundert Jahre später kam durch die Bemühungen des berühmten Mathematikers Leibniz in Deutschland der Gregorianische Kalender allgemein zur Einführung, im Jahre 1700. In England wurde er noch einige Zeit später eingeführt, während in Rußland und in den christlichen Balkanländern der alte Julianische Kalender noch heute in Kraft ist, wodurch diese Länder, da der Fehler desselben niemals, wie beim Gregorianischen Kalender, berichtigt worden ist, zwölf Tage in der Zeitrechnung zurück sind. Auf diese Länder bezügliche Daten werden deshalb gewöhnlich mit den Bezeichnungen (a. St.) bezw. (n. St.) d. h. alten, bezw. neuen Stils bezeichnet, um zu bestimmen, ob das Datum sich auf den russischen (Julianischen) oder unseren modernen Kalender bezieht.

In der Mechanik und Technik gilt allgemein für Bewegungen und Geschwindigkeiten als Zeiteinheit die Sekunde, wenn nicht in besonderen Fällen ein anderes Zeitmaß ausdrücklich angegeben oder selbstverständlich ist (so bei der Geschwindigkeit von Eisenbahnzügen und Schiffen die Stunde); nur bei Drehbewegungen bezieht sich die Umdrehungszahl stets auf die Minute.

Die Bewegung wird erklärt als die Ortsveränderung eines Körpers im Raume. Die Verbindungslinie aller bei der Bewegung von dem Körper nacheinander im Raume eingenommenen Lagen heißt der Weg oder die Bahn der Bewegung; diese kann eine gerade oder eine krumme Linie sein und hiernach unterscheidet man geradlinige oder krummlinige Bewegung. Werden bei der Bewegung in gleichen kleinsten Zeitabschnitten gleiche Bahnlängen zurückgelegt, so ist die Bewegung eine gleichförmige; sind dagegen die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege ungleich, so ist die Bewegung eine ungleichförmige. In letzterem Falle ist zu unterscheiden die beschleunigte und verzögerte Bewegung; bei ersterer werden die in gleichen kleinsten Zeitabschnitten zurückgelegten Wege immer länger, bei letzterer kleiner. Je nachdem nun die Zunahme oder die Abnahme dieser Wegelängen für gleiche Zeiten gleich oder ungleich ist, haben wir die gleichmäßig oder ungleichmäßig beschleunigte oder verzögerte Bewegung. Für die gleichmäßig beschleunigte Bewegung bietet ein frei fallender Stein ein Beispiel, denn in den aufeinander folgenden kleinsten Zeitabschnitten werden die zurückgelegten Weglängen um ein gleiches Maß vergrößert; umgekehrt bildet die Bewegung eines senkrecht in die Höhe geworfenen Steines ein Beispiel für die gleichmäßig verzögerte Bewegung. Das Verhältnis der Weglänge bei einer Bewegung zu der dazu gebrauchten Zeit ergibt den Begriff der Geschwindigkeit; derselbe ist in der Mechanik genau umgrenzt, indem er die Länge des Weges bedeutet (in Meter gemessen), die ein Körper in der Zeiteinheit durchläuft. Wir haben also entsprechend den verschiedenen Arten der Bewegung auch gleichförmige und ungleichförmige Geschwindigkeit und bei letzterer gleichförmig und ungleichförmig beschleunigte und verzögerte Geschwindigkeit. Bei der gleichförmigen Geschwindigkeit ist das Verhältnis Weg zur Zeiteinheit konstant, die Geschwindigkeit ist in allen Punkten der Bahn, also in jedem Augenblick gleich. Bei der ungleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit in jedem Bruchteile einer Sekunde, in jedem Augenblick verschieden, und die Geschwindigkeit bei der ungleichförmigen Bewegung in einem bestimmten Augenblicke bedeutet die Weglänge, die der Körper während einer Sekunde von diesem Augenblick ab mit gleichförmiger Geschwindigkeit zurücklegen würde. So beträgt die Geschwindigkeit eines frei fallenden Körpers nach der ersten Sekunde 9,81 m, d. h. wenn der Körper in der zweiten Sekunde mit gleichförmiger Geschwindigkeit weiter fallen würde, so würde er in dieser Sekunde 9,81 m durchfallen; der wirkliche, in der ersten Sekunde zurückgelegte Weg ist dagegen nur 4,9 m, da die Bewegung mit der Geschwindigkeit 0 angefangen hat. Die bei der gleichmäßig beschleunigten bezw. verzögerten Geschwindigkeit in jeder Minute stattfindende Zunahme bezw. Abnahme an Geschwindigkeit heißt Beschleunigung bezw. Verzögerung. Außer dem gewöhnlichen und allgemein gebräuchlichen Geschwindigkeitsmaß Metersekunde wird in der Technik noch häufig das Maß Kilometer pro Stunde angewendet (besonders bei Eisenbahnen und Schiffen).

Bei rotierenden Körpern wird die Drehgeschwindigkeit auf verschiedene Weise gemessen; die Umfangsgeschwindigkeit bezeichnet den von einem Punkte des Umfanges in einer Sekunde zurückgelegten Weg in Metern. Ein anderer Begriff ist die Winkelgeschwindigkeit; dieselbe bedeutet den Winkel als Bogen vom Radius 1 m gemessen, zwischen der Anfangs- und der Endlage zum Drehungsmittelpunkt beim Anfang und Ende einer Sekunde; hieraus ergibt sich direkt der Begriff der Winkelbeschleunigung. Das Maß für Umfangsgeschwindigkeit, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung ist also dasselbe wie bei der Geschwindigkeit geradliniger Bewegung, nämlich die Längeneinheit (Meter), indem auch bei der Winkelgeschwindigkeit der Winkel als Bogenlänge gemessen wird. In vielen Fällen wird in der Technik auch die Drehungsgeschwindigkeit nur durch die Zahl der Umdrehungen in einer bestimmten Zeit angegeben, und zwar gilt hier als Zeiteinheit stets die Minute, nicht die Sekunde; das Maß ist also hierbei nur eine Zahl.

Die Messung von Geschwindigkeiten geschieht in den meisten Fällen durch direkte Beobachtung bezw. Messung der zurückgelegten Strecke (in Metern) und der zugehörigen Zeit (in Sekunden) und Dividierung der ersteren durch letztere. In vielen Fällen ist aber die zurückgelegte Strecke praktisch nicht ohne weiteres meßbar, oder auch das Zeitintervall, auf welches man sich bei der Beobachtung beschränken müßte, ist so klein, daß die Uhren, auch die für genauere Zeitbeobachtungen konstruierten Sekundenuhren, den Dienst versagen. Für solche Fälle sind besondere Geschwindigkeitsmesser verschiedener Art für die verschiedenen vorkommenden Zwecke konstruiert worden, z. B. das Log zur Messung der Schiffsgeschwindigkeit, das Anemometer für die Windgeschwindigkeit. In neuerer Zeit hat man sogar Vorrichtungen erfunden zur Messung der Geschwindigkeit fliegender Geschosse.

Eine besondere Klasse von Geschwindigkeitsmessern dient zur Messung von Umdrehungsgeschwindigkeiten. Die sogenannten Tourenzähler geben in einer zu beobachtenden Zeit die Anzahl der Umdrehungen einer rotierenden Achse (Welle) an. Bei den Tachometern kann man ohne Beobachtung der Zeit in jedem Augenblick direkt die Umdrehungsgeschwindigkeit ablesen; man hat dieselben auch mit Vorrichtungen versehen, wodurch fortlaufend die Geschwindigkeiten in Form einer Kurve graphisch aufgezeichnet werden.

Nachstehend seien noch die Geschwindigkeiten einiger Bewegungen angegeben.

		m pro Sekunde	km pro Sekunde
Fußgänger . .	etwa	1,25	—
Schneller Fluß .	„	4,0	—
Schnellläufer . .	„	7,0	—
Radfahrer . . .	„	10,0	—
Torpedoboot . .	„	12,0	—
Rennpferd . . .	„	12,6	—
Schnellzug . . .	„	22,0	—
Brieftaube . . .	„	27,0	—
Orkan	„	45,0	—
Schall in der Luft	„	337,0	—
Kanonenkugel .	etwa	500,0	—
Flutwelle (Max.)	„	800,0	—
Mondbewegung um die Erde . .	„	—	1,0
Erde um die Sonne	„	—	29,5
Sternschnuppen im Mittel . . .	„	—	40,0
Telegraphenstrom	„	—	11 700,0
Licht	„	—	300 000,0

Die Materie und ihre Eigenschaften.

Vom Standpunkte der Physik und Mechanik aus wird die Materie definiert als das Raumausfüllende. Die physikalische Verschiedenheit der Körper beruht nur auf der Verschiedenheit der Art der Raumausfüllung, während in chemischer Beziehung die qualitative Verschiedenheit des Raumausfüllenden wichtig ist. Die Gesamtsumme der Materie in der Welt ist unveränderlich; es kann keine Materie zerstört oder geschaffen werden. Dieser Satz hat schon sehr lange, auch bei den Naturforschern des Altertums, gegolten. Demokrit und Epikur gingen schon von demselben aus; und die Frage Ciceros: „hat je ein Physiker den Satz aufgestellt, daß etwas aus nichts entstehen oder etwas zu nichts werden könne?“ zeigt, daß diese Anschauung zu seiner Zeit allgemein und ohne Widerspruch gültig war.

Über das Wesen der Materie finden wir bei dem Milesier Thales (575 vor Christi Geburt) die Anschauung, daß alles Bestehende aus dem Wasser entstanden sei und

sich wieder in Wasser auflöse. Anaximander nahm als Grund aller Materie einen Urstoff an, der, in beständiger Bewegung begriffen, die einzelnen Stoffe ausscheide, zuerst das Warme, dann das Kalte, durch deren Vermischung das Flüssige entstehe, aus welchem wieder wie bei Thales alle übrigen Stoffe entstehen. Herakleitos aus Ephesus faßte das Feuer als die Ursache alles Werdens, als einen lebendigen Vorgang (nicht Urstoff) auf, aus dem alle Dinge entständen. Empedokles nahm dann die vier Elemente: Erde, Wasser, Luft und Feuer als Grundstoffe an, aus denen alle Materie zusammengesetzt sei. Aristoteles bildete diese Lehre, die bis zum Mittelalter bestand, in folgender Weise recht unklar und mystisch aus: die vier Elemente hatten verschiedene Vollkommenheit, demgemäß sie in der Welt angeordnet waren; in der Mitte der Welt zu unterst die kalte und trockene Erde, rings um sie das kalte und nasse Wasser, darüber die warme und feuchte Luft und zu oberst, alles einschließend, das trockene und warme Feuer. Später kam hierzu noch (wohl ebenso wie die vier Elemente des Empedokles aus dem Morgenlande) als fünftes Element, als die „Quintessenz", welche die höchste Vollkommenheit besaß, der Äther hinzu, aus dem die Himmelskörper bestanden. Im Mittelalter tauchten eine Anzahl neuer, zum Teil recht phantastischer Ideen über die Natur der Materie auf. Giordano Bruno, welcher wegen seiner gegen die scholastische Wissenschaft gerichteten Lehre 1600 als Ketzer den Scheiterhaufen besteigen mußte, nahm den Stoff aus Atomen bestehend an, deren Zwischenräume mit dem Äther ausgefüllt seien, den er als den Weltgeist betrachtet. Die Alchimisten nahmen nur noch zwei Elemente, Merkurius und Sulphur an; ersterer entsprach dem beseelten Äther, oder dem Weltgeist, Spiritus mundi. Im 16. Jahrhundert kam noch als dritter Grundstoff das Salz als Prinzip des Feuerbeständigen hinzu. Dann wurde wieder das Feuer als Element, ja selbst als Substanz ausgeschieden.

Es würde zu weit führen, die verschiedenen, mehr oder weniger unklaren und mystischen Erklärungen dieser und der zunächst folgenden Zeit über das Wesen der Materie weiter zu verfolgen; doch machten sich schon hin und wieder die Anfänge der Molekular- und Atomtheorie bemerkbar, die in erster Linie von Lavoisier, dem Vater der modernen Chemie (geb. 1743, unter der Schreckensherrschaft der französischen Revolution 1794 guillotiniert), wissenschaftlich begründet wurde. Diese Theorie ist die Grundlage der modernen Chemie und hat bis jetzt unumschränkt geherrscht. Nach derselben besteht die Materie aus kleinsten, auf keine Weise weiter teilbaren Teilchen, den Atomen. Diese sind unveränderlich in Größe und Gestalt; es gibt etwa 70 in ihrer Beschaffenheit wesentlich verschiedene Arten von Atomen, und diesen entsprechen die 70 Grundstoffe oder Elemente der Chemie. Durch eine gegenseitige Anziehungskraft oder chemische Affinität der Atome verbinden sich dieselben in gesetzmäßiger Weise zu Atomgruppen oder Molekülen, und letztere werden wieder durch die zwischen ihnen herrschende Anziehungskraft oder Kohäsion zu Körpern vereinigt. Die Verbindung der Atome in den Molekülen kann nicht auf mechanischem Wege, sondern nur durch chemische Wirkungen getrennt werden. Durch die feinste überhaupt denkbare mechanische Zerkleinerung der Körper könnten also, wenn eine soweit gehende Teilung praktisch möglich wäre, nur Moleküle, nie einzelne Atome gebildet werden. Bestehen die Moleküle aus Atomen gleicher Art, so haben wir, wie schon erwähnt, die einfachen Körper oder Elemente, deren bis jetzt etwa 70 nachgewiesen sind, während die Moleküle aller anderen Körper aus Atomen verschiedener Art bestehen, die Körper also aus mehreren Elementen zusammengesetzt sind. Die Gesetzmäßigkeit der Verbindung der Atome und der Trennung der Moleküle zu Atomen erforscht die Wissenschaft der Chemie; dieselbe hat mit der Atomtheorie die großartigsten Erfolge gezeitigt. Ob aber dieser so geistreich ausgebildeten, anschaulichen und für die praktische Entwickelung so überaus vorteilhaften Theorie auch Wirklichkeit zu Grunde liegt, ist keineswegs unbedingt sicher. Nicht alle bedeutenden Chemiker glauben an das thatsächliche Bestehen und Wirken der Atome; manche fassen die ganze Lehre mehr als ein Hilfsmittel für die Auffassung und Forschung auf. Selbst die bis vor kurzem wohl von den meisten Chemikern als unumstößlich und der Wirklichkeit entsprechende Lehre, daß alle Materie aus den absolut unveränderlichen 60—70 Elementen bestehe, wird in

neuester Zeit in Zweifel gezogen. Man hat, von verschiedenen Beobachtungen und Gesetzmäßigkeiten angeregt, angefangen, sich mit dem Gedanken zu befassen, daß doch nur ein einziger, wirklicher Urstoff existiere, der nur durch Zusammenlegung seiner kleinsten Teile in bestimmten Mengenverhältnissen, entsprechend den Atomgewichten der Elemente, die letzteren bilde. Bis jetzt haben diese neuesten Bestrebungen noch kein greifbares Ergebnis gezeitigt; vielleicht kommt aber doch in nicht zu ferner Zeit der Mann, der, wie Mayer, Joule und Helmholtz die Einheit der Kraft, auch die Einheit der Materie nachweist und alle unsere jetzigen 70 Elemente auf einen Urstoff zurückführt, dessen verschiedenartige Erscheinungsformen die gesamte Materie ist.

Für die Mechanik ist indessen die Frage nach dem Wesen der Materie und ihrer atomistischen Zusammensetzung ohne Bedeutung; für sie kommen nur die physikalischen Eigenschaften der Körper in Betracht, und es genügt die anfangs gegebene Erklärung, wenn dieselbe auch über das eigentliche Wesen der Materie keinen Aufschluß gibt.

Teilbarkeit. Eine allgemeine Eigenschaft der Materie, also aller Körper, ist die mechanische Teilbarkeit, die schon oben kurz berührt wurde; sie geht außerordentlich weit, ja ist praktisch fast unbegrenzt. Aus den Gebirgen werden von anstehenden Granitfelsen große Blöcke herausgesprengt; bei der Bearbeitung derselben fallen kleinere Stücke ab, die für Säulen, Platten u. s. w. nicht zu gebrauchen sind; dieselben werden mit dem Hammer weiter zerkleinert zu Straßenschotter. Auf der Chaussee werden die einzelnen Stücke von dem darüber gehenden Fuhrwerk mehr und mehr zermalmt, bis nur Staub oder Schlamm übrig bleibt; dieser Staub besteht immer noch aus einzelnen Körnern oder Körpern, und unter dem Mikroskop erkennt man deutlich die Formen derselben. Durch feine Mühlen kann jedes Körnchen wieder in viele kleinere Partikelchen geteilt werden, und es hängt nur von der Größe des Druckes und der Feinheit der Politur der Walzen ab, wie fein schließlich die Teilchen werden. Man kann sich kaum einen Begriff davon machen, wie weit die Teilbarkeit der Körper geht, wenn man bedenkt, daß eine im Wasser enthaltene Substanz, z. B. Kochsalz noch direkt und sicher nachzuweisen ist, wenn 1 Teil in 10 Millionen Teilen Wasser verteilt ist; ja, die unfaßbar kleine Menge von 0,0000003 Milligramm oder 3 Zehntausendmilliontel Gramm erteilt nach Bunsen einer Gasflamme noch eine nachweisbare Färbung. Streicht man mit einer Hand über die andere gegen eine Bunsenflamme hin, so erscheint sofort im Flammenspektrum die gelbe Linie des Kochsalzes; in den Hautausscheidungen ist nämlich letzteres enthalten, und durch das Streichen mit der Hand fliegen Spuren davon in die Flamme. Rosanilin erteilt nach Hoffmann in einer Verdünnung von 1 Hundertmilliontel in Alkohol diesem noch eine deutliche Färbung. Ein kleines Tröpfchen eines ätherischen Öles erfüllt bei der Verdunstung den Raum eines großen Zimmers mit seinem Dufte; ein Stückchen Moschus, welches andauernd ein Zimmer mit seinem Geruche erfüllt, zeigt nach Jahren kaum einen nachweisbaren Gewichtsverlust. Man kann auf einem Silberdrahte eine zusammenhängende Goldschicht von 0,000004 mm Stärke erzeugen, indem man einen mit einer dünnen Goldschicht überzogenen Cylinder aus Silber zu feinem Draht auszieht. 1 Milligramm Gold bedeckt auf diese Weise eine Fläche von 60 qm. Bekannt ist das Beispiel, daß man ein überlebensgroßes Reiterstandbild mit einem Dukaten ganz übergolden kann.

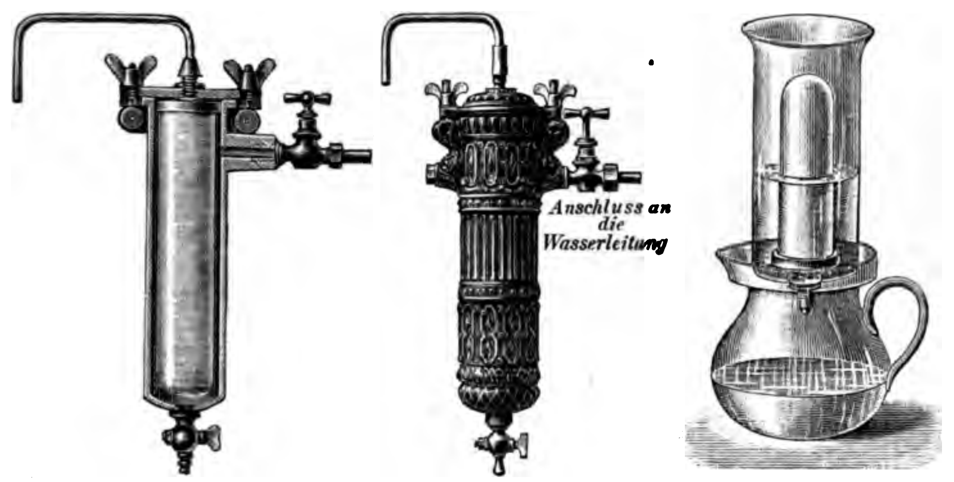
Porosität. Vergleichen wir einen Badeschwamm und einen Brocken Marmor, so erscheint als ein Hauptunterschied beider Körper in ihrer physikalischen Eigenschaft, daß ersterer porig oder porös, letzterer dagegen dicht ist. Vollständig dicht ist aber auch der Marmor nicht; auch er ist porös, denn er vermag kleine Mengen Flüssigkeiten einzusaugen. Ein durch aufgelöste Farbe z. B. Anilin entstandener Fleck läßt sich, wie manche Hausfrau schon zu ihrem Kummer bei ihrem Waschtisch oder ihrer Spiegelkonsole erfahren hat, durch Wischen und Reiben nicht wieder fortbringen; die Farblösung ist eben in die Poren eingedrungen und sitzt nicht nur auf, sondern in dem Marmor, wenn auch nur in der obersten sehr dünnen Schicht. Wird eine Röhre an einem Ende dicht mit einem Brettchen oder einem Stück Leder verschlossen und dann durch Anschluß an eine Luftpumpe luftleer gemacht, so dringt Quecksilber, welches man auf das Holz oder das Leder gießt, unter dem äußeren Luftdruck durch die Poren desselben hindurch und fällt als feiner

Regen in die Röhre. Wird ein mit Wasser gefülltes, an beiden Enden dicht verschlossenes Stück Bleirohr stark zusammengepreßt, so dringt das Wasser durch das Blei hinaus. Vollständig dicht ist streng genommen kein Körper, alle haben die Eigenschaft der Porosität. Die Mauern unserer Häuser, besonders die aus Ziegelsteinen ausgeführten, sind in hohem Grade porös. Durch die Mauern vollzieht sich ständig ein Kreislauf der äußeren und inneren Luft, wodurch die so notwendige Lüftung unserer Wohnungen bewirkt wird, auch bei geschlossenen Fenstern. Füllt man eine kleine Glas- oder Eisenröhre mit Zementmörtel und stampft diesen schichtenweise fest ein, so bildet er nach dem Erhärten eine vollständig feste Masse; aber dicht ist dieselbe nicht. Sie vermag ziemlich viel Wasser aufzunehmen; wenn man das eine Ende der Röhre mit einem als Manometer dienenden einfachen U-förmigen Rohr verbindet, welches teilweise mit Wasser gefüllt ist, so kann man durch kräftiges Einblasen in die eine Seite der Röhre zeigen, daß Luft durch den Zementkörper hindurchdringt, indem das Wasser in dem Manometer ins Schwanken gebracht wird.

Die Porosität verschiedener Körper wird angewendet, um Flüssigkeiten zu *filtrieren*, d. h. Verunreinigungen auszuscheiden, indem das Wasser durch die Poren des Filters hindurchgeht, während die auszuscheidenden Teilchen auf der Oberfläche zurückbleiben. Zu diesem Zwecke muß der Filterstoff so beschaffen sein, daß seine Poren kleiner sind, als die kleinsten aus der Flüssigkeit auszuscheidenden Teilchen. Abb. 4 zeigt die Anwendung eines *Papierfilters*, wie sie sehr vielfach in den Laboratorien gebraucht werden. Aus besonders hergestelltem, ungeleimtem und nicht satiniertem Papier wird durch geeignete Faltung ein Trichter gebildet; dieser Filter wird in einen Glastrichter gesteckt, an dessen Wand sich das Papier, wenn es angefeuchtet wird, dicht anlegt. Wird jetzt Wasser eingegossen, welches mechanische Verunreinigungen enthält, so bleiben diese beim Durchsickern des Wassers auf dem Papier sitzen. Eine Befreiung von gelösten Substanzen kann durch Filtration nicht bewirkt werden. Besonders wichtig sind die Filter zur Reinigung von Trinkwasser. Bei städtischen Wasserwerken, denen kein vollkommenes reines Quell- oder Grundwasser zur Verfügung steht, die vielmehr auf die Verwendung von Flußwasser angewiesen sind, wie dies bei den zwei größten deutschen Städten Berlin und Hamburg der Fall ist, erfolgt die Reinigung durch *Sandfilter*. In großen Becken wird vollständig reiner Kies aufgeschichtet und darauf eine starke Lage reinen feinen Sandes. Durch diesen läßt man das Wasser durchsickern, wobei die Verunreinigungen auf der Sandoberfläche zurückgehalten werden. Die Filterfläche der Berliner Wasserwerke ist 101 460 qm groß; alle Filterbassins sind überwölbt. Hamburg hat 137 700 qm offene Filter. Man hat auch viele sogenannte *Kleinfilter* für den Hausgebrauch hergestellt, die zum bloßen Klären von trübem, aber sonst nicht schädlichem Wasser ganz gut sind. Sobald es sich aber darum handelt, aus Wasser, welches Bakterien enthält, die kleinsten Lebewesen der Pflanzenwelt, von denen gewisse Arten ansteckende Krankheiten erzeugen, oder solche vielleicht enthalten kann, diese mit Sicherheit zu entfernen, also Wasser in gesundheitlicher Hinsicht zu verbessern, erfüllen die meisten Kleinfilter ihren Zweck nicht mehr; die Bakterien sind so klein, daß sie durch die Poren der meisten Filter hindurchgehen können. Vollständig bakteriendicht sind die von dem berühmten Professor Pasteur in Paris zuerst konstruierten *Porzellanfilter*, doch liefern dieselben eben wegen der außerordentlichen Feinheit ihrer Poren nur so wenig Wasser, daß sie für den gewöhnlichen Hausgebrauch nicht anwendbar sind und nur in Laboratorien zur Beschaffung kleiner Mengen völlig keimfreien, sogenannten sterilen Wassers verwendet werden. Wie zahlreiche Untersuchungen ergeben haben, erfüllen auch die von Dr. *Nordtmeyer* erfundenen unter der Bezeichnung *Berkefeldfilter* bekannten Kieselgurfilter der Berkefeldfilter-Gesellschaft zu Celle ihren Zweck; dabei geben sie für den Hausgebrauch zu Genußzwecken eine genügende Menge reines Wasser. Ein solches Filter ist ein Hohlcylinder von gebrannter Infusorienerde; letztere


4. Papierfilter und seine Anwendung zum Filtrieren.

besteht aus außerordentlich kleinen Schuppen von Diatomeen, die von Infusorien früherer Zeiten herstammen. Das Wasser dringt von außen durch diesen Cylinder hindurch und wird im Innern abgelassen. Die an der Außenwand sich absetzenden Verunreinigungen werden von Zeit zu Zeit abgewaschen. Die Abb. 5 u. 6 zeigen ein solches für Anschluß an die Wasserleitung eingerichtetes Filter im Schnitt und in der Ansicht. Der Filtercylinder steckt in einem dicht verschlossenen, gußeisernen Gehäuse, welches mittels Lötung an die Wasserleitung angeschlossen wird. Bei Öffnen des Hahns tritt das Wasser in das Gehäuse und filtriert durch die Wandung des Filters nach dem inneren Hohlraum, aus welchem es durch das obere Abflußrohr ausfließt; unten ist ein Hähnchen zum Ablassen des sich auf dem Boden ablagernden Schmutzes. Um den Filtercylinder von Zeit zu Zeit durch Abbürsten gründlich zu reinigen, wird der obere, durch Flügelschrauben festgehaltene Verschlußdeckel des Gehäuses gelöst, worauf sich das Filter herausnehmen läßt. Das Filter wird in verschiedener Anordnung für die verschiedensten praktischen Verwendungszwecke hergestellt. Wo keine Wasserleitung vorhanden ist, kann das Filter ohne Druck als Tropffilter angewendet werden, wie Abb. 7 zeigt; hierbei ist allerdings die Leistungsfähigkeit eine viel geringere, als wenn mit Druck filtriert wird.



5 u. 6. Berkefeldfilter (1/7 natürl. Größe). 7. Berkefeld-Tropffilter (1/7 natürl. Größe).

Auch einige Steine sind so porös, daß sie Wasser durchlassen. So werden in Indien, in Zentral- und Südamerika vielfach ausgehöhlte Steine zum Filtrieren von Wasser verwendet. Abb. 8 zeigt ein sehr primitives aber vollständig zur Zufriedenheit funktionierendes Filter aus einem großen, ausgehöhlten Stück Bimsstein aus Ecuador in Zentralamerika. Von der Verwendung des Holzes zur Filtrierung von Meerwasser wird andern Orts die Rede sein.

Festigkeit und Elastizität. Die Moleküle aller festen und flüssigen Körper sind so miteinander verbunden, daß sie einer Änderung ihrer gegenseitigen Lage, einer Teilung oder Formveränderung einen Widerstand entgegensetzen; diese Molekularanziehung wird in der Physik Kohäsion genannt, im gewöhnlichen Leben und in der Mechanik spricht man von der Festigkeit. Bei den flüssigen Körpern ist dieselbe nur gering: sie vermag die Teile nicht so weit zusammenzuhalten, daß Flüssigkeiten eine eigene Gestalt behalten; diese sind vielmehr gestaltlos und müssen durch Gefäße gehalten werden, damit sie nicht auseinanderlaufen. Die Gase besitzen gar keine Festigkeit, sie sind vielmehr bestrebt, sich nach allen Seiten auszudehnen. Diese Eigenschaft heißt die Expansionskraft der Gase. Bei den festen Körpern ist die Festigkeit sehr verschieden; sie hängt von der chemischen Zusammensetzung, der physikalischen Beschaffenheit und der Art der Beanspruchung der Körper ab.

Die Festigkeitslehre ist ein sehr wichtiges Kapitel der Mechanik: sie lehrt die Tragfähigkeit und erforderliche Stärke von Fundamenten und Mauern, von Brücken und Trägern, Ketten und Seilen kennen; sie bestimmt die Stärke aller Maschinenteile, die richtige Auswahl unter den verschiedenen Materialien für die verschiedenen Verwendungszwecke, denn das eine Material widersteht besser dem Zug, das andere dem Druck, das eine kann keine Stöße aushalten, das andere wohl u. s. w. Von den für die Technik hauptsächlich in Frage kommenden Materialien hat die größte Festigkeit der Stahl; dann kommt Schmiedeeisen und Gußeisen. Im Maschinenbau werden deshalb alle Teile, welche bei nicht zu großen Dimensionen große Festigkeit besitzen sollen, aus Eisen und Stahl hergestellt, wenn nicht besondere Gründe für einzelne Teile andere Materialien bedingen. Große Brücken, hohe Türme, die nicht ihrer selbst wegen als monumentale Bauwerke aus Mauerwerk hergestellt werden sollen, Dampfschiffe u. s. w. werden fast nur noch aus Stahl und Eisen hergestellt. Holz besitzt bedeutend geringere Festigkeit, dafür aber andere Vorzüge; es ist viel leichter, kann ohne Umstände an Ort und Stelle beim Bau bearbeitet und in die richtige Form gebracht werden, während Eisenteile vorher genau richtig fertiggestellt werden müssen, weil die Bearbeitung von Eisen ohne maschinelle Einrichtung schwierig ist.



8. Bimssteinfilter.

Eine der Erscheinungsformen der Festigkeit ist die Elastizität, d. i. das Bestreben gewisser Körper, ihre Form beizubehalten oder, wenn sie durch Druck- oder Stoßkräfte verändert worden ist, wiederherzustellen. Drückt man einen Gummiball an einer Seite ein, so nimmt er nach Aufhören des äußeren Druckes seine runde Form wieder an. Wirft man einen Gummiball auf die Erde, so springt er in die Höhe; dies kommt daher, daß die Seite, die auf den Boden auftrifft, eingedrückt wird; bei der gleich darauf stattfindenden Wiederherstellung der Form wird ein Druck ausgeübt, welcher den Ball in die Höhe treibt. Wäre der Ball vollkommen elastisch, so würde er ohne Luftwiderstand wieder bis auf dieselbe Höhe springen, von der er frei gefallen (nicht mit Kraft geschleudert) ist. Eine Thonkugel, welche nicht elastisch ist, bleibt liegen und wird dauernd platt, oder sie fällt auseinander. Mit jeder Elastizitätserscheinung ist also eine momentane Formveränderung, bei Kugeln eine Abplattung verbunden. Werden zwei gute Billardbälle mit derselben Geschwindigkeit genau zentral gegeneinandergestoßen, so fahren beide sofort wieder mit fast gleicher Geschwindigkeit auseinander; auch das feste, harte Elfenbein erfährt hierbei eine augenblickliche Formveränderung. Dies läßt sich experimentell nachweisen. Berührt man mit einer genau runden, polierten kleinen Elfenbeinkugel eine abgeschliffene, harte Elfenbein- oder Marmorplatte, deren Oberfläche ganz dünn mit Öl überzogen ist, so zeigt sich die Berührungsstelle nur als ein Punkt. Läßt man aber die Kugel von einiger Höhe herabfallen, so zeigt sich an der Aufschlagstelle ein kleiner Kreis; eine dementsprechende Abplattung hat die Kugel beim Aufschlag erfahren. Auch für die elastischen festen Körper gibt es eine Grenze für die Größe des Druckes, nach welchem sie ihre Form wiederherstellen; bei Überschreitung dieser sogenannten Elastizitätsgrenze, welche für die verschiedenen Materialien sehr verschieden ist, wird die Formveränderung eine bleibende. Vollkommen elastisch sind nur die Gase, sie nehmen nach einer Volumenveränderung durch Druck — von Änderung der Gestalt kann man hier nicht sprechen, da

sie ja keine selbständige Gestalt haben — welche außerordentlich weit, bis auf einen geringen Bruchteil der anfänglichen Ausdehnung getrieben werden kann, alsbald nach Aufhören des Druckes ihr früheres Volumen wieder ein. Gase und Flüssigkeiten pflanzen vermöge ihrer Elastizität, und da bei der mangelnden Kohäsion ihre Teilchen zu einander sich beliebig verschieben können, einen Druck gleichmäßig nach allen Seiten fort. Hierauf beruhen die später zu besprechenden wichtigen hydrostatischen Gesetze, der Auftrieb von Luftballons u. s. w.

Die Adhäsion. Mit Adhäsion oder Anhaftekraft bezeichnet man das Aneinanderhaften verschiedener Körper an ihrer Berührungsstelle; diese Eigenschaft hat mit der Kohäsion oder dem inneren Zusammenhang einige Verwandtschaft und kann unter Umständen in diese übergehen. Wenn wir ein Glas Wasser ausschütten, so bleibt an der Glaswand, entgegen der Schwerkraft, eine Schicht Wasser haften; durch Schwenken können wir viele Tröpfchen davon abschleudern, aber ganz trocken wird das Glas dabei doch nicht, immer noch können wir Feuchtigkeit abwischen. Die Kraft, die das Wasser zurückhält, ist die Adhäsion zwischen diesem und der Glaswand. Das Schreiben wie Zeichnen mit Blei- oder Farbstiften auf Papier, mit Kreide auf der Tafel beruht auf der Adhäsion; die beim Überfahren mit einem gewissen Druck von dem Stifte bezw. der Feder gelösten Teilchen haften an der Papier- oder Holzfläche fest. Das Vergolden mit Blattgold, das Festhaften der Amalgamschicht auf den Spiegelglasplatten beruht auf der Adhäsion, ebenso das Leimen und Kitten. Wenn man zwei sehr genau eben geschliffene Glasplatten in möglichst innige Berührung bringt, indem man sie von der Seite unter Zusammendrücken übereinanderschiebt, so haften sie nachher fest zusammen; die eine bleibt frei an der anderen hängen, selbst wenn man sie mit Gewichten beschwert. Dies kann so weit gehen, daß man sie nicht mehr oder nur mit Mühe voneinander trennen kann, ohne sie zu zerbrechen. In Glaslagern legt man deshalb die Glasscheiben nicht direkt aufeinander, sondern trennt sie durch Leisten voneinander. Die Adhäsion beruht nicht auf der Wirkung des äußeren Luftdruckes, da sie auch im luftleeren Raume wirksam ist; sie ist vielmehr eine Art abgeschwächter Kohäsion, sie ist nicht so stark wie diese, weil die Berührung nicht so innig, die Entfernung der Moleküle größer ist. Wenn man die Berührung sehr innig machen kann, dann geht die Adhäsion vollständig in Kohäsion über, die zwei Körper verbinden sich zu einem, wie es beim Zusammenschweißen zweier Stücke Eisen der Fall ist. Durch das Hämmern des ganz weichen, weißglühenden Eisens werden die beiden Stücke in möglichst dichte Berührung gebracht, wobei die dazwischen befindliche Luft ausgetrieben wird.

Die Aggregatzustände.

Es ist eine alte Gewohnheit, die Körper nach drei verschiedenen Aggregatzuständen zu gruppieren in feste Körper, Flüssigkeiten und Gase. Diese Einteilung ist bequem und hat für gewöhnlich auch genügend klare Unterscheidungen; dieselben liegen in der größeren oder geringeren Kohäsion der Körper. Im festen Aggregatzustande sind Gestalt und Volumen vollständig bestimmt; im flüssigen Zustande ist das Volumen noch ein bestimmtes, aber keine feste Gestalt mehr vorhanden, und Körper im gasförmigen Zustande haben weder besondere Gestalt noch bestimmtes Volumen. Diese drei Bedingungen bilden aber keine vollständig scharfe allgemeine Trennungslinie, besonders in wissenschaftlichem Sinne; sie sind nur Charakteristika für die Typen der drei Aggregatzustände. Eine große Anzahl in der Natur vorkommende Körper gruppieren sich um diese herum und nehmen eine Mittelstellung zwischen dem einen und dem andern Aggregatzustand ein, ohne daß eine genaue Scheidung möglich ist. Klebrige breiige Körper wie Sirup, Gallerte u. s. w. führen vom festen zum flüssigen Aggregatzustand. Der vollständig dünnflüssige heiße Leim wird beim Erkalten langsam steifer und härter, bis er ein vollkommen fester, glasartiger harter Körper geworden ist; in welchem Augenblicke hat er aufgehört, Flüssigkeit zu sein, und angefangen, zu den festen Körpern zu zählen? Schärfer ist der Übergang von den Flüssigkeiten zu den gasförmigen Körpern abgegrenzt, doch besteht auch hier keine unbedingte Grenzlinie für alle Fälle. Wasserstoff, Sauerstoff, Luft lassen sich bei einer Temperatur von 20°, und ebenso Kohlensäure

bei über 31° in keiner Weise sichtbar verflüssigen, weil diese Gase beim Zusammenpressen bis zum Sättigungspunkte ebenso dicht sind, wie flüssiger Wasserstoff, Sauerstoff, flüssige Luft oder Kohlensäure bei derselben Temperatur. Man kann also ihren Zustand unter diesen Verhältnissen ebensowohl dem gasförmigen wie dem flüssigen Aggregatzustand zuteilen. Hat man bei unter 30° C. ein starkes beiderseits zugeschmolzenes Glasröhrchen etwa zur Hälfte mit flüssiger Kohlensäure gefüllt, während darüber gasförmige Kohlensäure sich befindet, und erwärmt das Röhrchen mäßig, z. B. durch bloßes Anfassen mit der Hand, so wird bis 30,9° die Dichte der flüssigen und gasförmigen Kohlensäure gleich und damit verschwindet die sichtbare Flüssigkeitsoberfläche; umgekehrt erscheint beim Erkalten in der Mitte des Röhrchens ein Nebel, worauf sich hier der Inhalt wieder in eine deutlich getrennte untere Hälfte mit Flüssigkeit und eine obere mit Gas scheidet.

Viele Körper können in der Natur in allen drei Aggregatzuständen auftreten, so das Wasser im flüssigen Zustande, fest als Eis und gasförmig als Wasserdampf. Alle Gase lassen sich zu Flüssigkeiten verdichten oder kondensieren; und alle Flüssigkeiten können in den festen Zustand übergeführt oder zum Gefrieren gebracht werden. Umgekehrt kann man alle einfachen festen Körper verdampfen. Freilich erst in den letzten Jahren ist es mittels des elektrischen Stromes gelungen, so hohe Hitzegrade zu erzeugen, wie sie notwendig sind, um gewisse bis dahin nur im festen und höchstens noch im flüssigen Zustande gekannte Körper zu verdampfen. Der französische Gelehrte Moisson hat mit seinem elektrischen Schmelzofen neue sehr interessante Versuche gemacht. Er verdampfte in der Zeit von 5 Minuten 30 Gramm Kupfer; die Dämpfe kondensierten unter dem Deckel des Ofens in Form von kleinen Kügelchen. Während der Verdampfung drangen an den Stellen des Ofens, wo die Kohlenstäbe eingeführt waren, zwischen denen der elektrische Flammenbogen gebildet wird, glänzende Flammen mit gelbem Rauch hervor, welche von dem ausströmenden, an der Luft verbrennenden Kupferdampfe herrührten. Silber wurde leicht in kurzer Zeit destilliert; auch Platin wurde bald zum Kochen gebracht und verdampft. Dasselbe gelang mit Gold; bei der Kondensation des Golddampfes bildete sich ein feines, purpurglänzendes Pulver. Auch Eisen konnte leicht in ziemlichen Mengen verdampft werden. Zum erstenmal gelang es auch, reinen Kohlenstoff zu verdampfen. Sogar feuerfester Thon, welcher bei industriellen Feuerungen für die höchsten Hitzegrade als feuerfester Stoff verwendet wird, konnte bei einer Stärke des elektrischen Stromes von 1000 Ampère destilliert werden. Der Kohlenstoff geht nicht, wie die anderen Körper, zuerst in den flüssigen Zustand über, sondern verwandelt sich unmittelbar in Dampf, der sich als feines Graphitpulver niederschlägt. Bei elektrischen Glühlampen beschlägt sich die Innenseite des Glases bekanntlich nach längerer Brenndauer mit einer feinen dunklen Schicht, welche die Lichtstärke bedeutend verringert; auch dies ist verdampfter und niedergeschlagener Kohlenstoff von der glühenden Bambusfaser. Ebenso lassen sich alle Flüssigkeiten verdampfen. Die beiden Faktoren, welche für die Aggregatzustände und ihre Änderungen in Betracht kommen, sind Druck und Wärme. Der Übergang aus dem festen in den flüssigen Aggregatzustand und umgekehrt geschieht im allgemeinen nur durch Wärmeveränderung, also Erwärmung (Wärmezufuhr), ohne daß der Druck in Betracht kommt. Bei der Vergasung von Flüssigkeiten und der Verdichtung oder Kondensierung von Gasen aber treten Wärme (Kälte) und Druck stets zusammen auf; der eine Faktor ist mit dem andern untrennbar verbunden.

Gase und Dämpfe. Verflüssigung von Gasen. Früher, bis in die zwanziger Jahre des 19. Jahrhunderts, unterschied man die luftförmigen Körper in Gase und Dämpfe; letztere waren kondensierbar, sie ließen sich zu Flüssigkeiten verdichten, während man alle Gase für permanent hielt, d. h. annahm, daß sie unter allen Umständen den gasförmigen Zustand beibehielten, durch kein Mittel in den flüssigen Zustand übergeführt werden könnten. Im Jahre 1823 gelang es aber dem Physiker Faraday, mehrere dieser für permanent gehaltenen Gase zu verflüssigen, und es wurde jetzt ein Unterschied gemacht zwischen koërciblen Gasen, die sich verflüssigen lassen, und permanenten Gasen. Dieser Unterschied galt bis vor zwanzig Jahren, bis der französische Physiker Cailletet

(Ende 1877) und kurz darauf, unabhängig von dessen Arbeiten, der Schweizer Gelehrte Raoul Pictet zu Genf zeigten, daß auch diese Unterscheidung hinfällig sei, indem sie mehrere bis dahin für permanent gehaltene Gase kondensierten.

Man unterscheidet jetzt wohl noch im gewöhnlichen Sprachgebrauche Gase und Dämpfe in der Weise, daß Gase bei gewöhnlicher Temperatur und atmosphärischem Druck luftförmig sind, während Dämpfe durch Erwärmung flüssiger Körper entstehen. Diese Dämpfe verhalten sich sehr verschieden, je nachdem sie gesättigt oder ungesättigt sind. Gesättigt ist ein Dampf, wenn er bei der gegebenen Temperatur das Maximum seiner Dichte und Spannung hat; ein mit gesättigtem Dampfe gefüllter Raum kann nicht mehr von diesem Dampfe aufnehmen, und durch Volumenverkleinerung, also Zusammeupressung, erhöht sich der Druck nicht, es wird vielmehr ein Teil des Dampfes flüssig, der Druck aber bleibt konstant. Jeder Dampf hat bei jedem Druck seinen bestimmten, von der Temperatur abhängigen Sättigungspunkt, oder die Spannung eines gesättigten Dampfes entspricht einer bestimmten Temperatur. So ist die Spannung des Wasserdampfes bei 100° C. = 1 Atmosphäre, bei 160° C. = 6 Atmosphären; bei Abkühlung kondensiert ein Teil des Dampfes, und der Druck nimmt ab. Ungesättigter Dampf hat bei der herrschenden Temperatur nicht das Maximum der Dichte; ein Raum, in dem er enthalten ist, kann noch mehr Dampf aufnehmen, oder man kann den Dampf bis zu einem gewissen Grade, nämlich bis zu seinem Sättigungspunkte, zusammendrücken oder abkühlen, ohne daß er sich teilweise verflüssigt. Bei den Gasen wächst nach dem Mariotteschen Gesetz Dichte und Spannung proportional der Volumenverminderung; ungesättigte Dämpfe erhalten sich also bis zu ihrem Sättigungspunkte wie Gase, oder umgekehrt: Gase sind Dämpfe, die bezüglich ihrer Dichte weit von ihrem Sättigungspunkte entfernt liegen. Zwischen Gasen im engeren Sinne und ungesättigten Dämpfen besteht kein wesentlicher, sondern nur ein gradueller Unterschied. Stark überhitzter Wasserdampf, z. B. von atmosphärischem Druck und 300° C. Temperatur, ist kein Dampf im gewöhnlichen Sinne mehr, sondern ein Gas. Aber auch alle Gase haben, wie die Dämpfe, ihren Sättigungs- oder Verflüssigungspunkt; alle lassen sich, wie schon oben erwähnt, kondensieren. Bei einigen Gasen, besonders z. B. bei den bis 1877 für permanent gehaltenen Gasen Wasserstoff, Sauerstoff, Luft, läßt sich die Verflüssigung nicht durch Volumenverkleinerung, also Verdichtung, allein bewirken, sondern es muß gleichzeitig eine Temperaturverminderung stattfinden. Über einem gewissen Temperaturgrad, der kritischen Temperatur oder dem kritischen Punkt, haben dieselben nämlich, wenn sie durch Verdichtung zur Sättigung gebracht sind, dieselbe Dichte, als wenn sie flüssig wären; eine weitere Verdichtung ist nicht möglich, und doch ist ein Übergang zum flüssigen Zustande nicht zu bemerken, wir haben hier also den schon früher erwähnten Übergang zwischen dem flüssigen und dem gasförmigen Aggregatzustand. Der kritische Punkt liegt für Wasserstoff bei 174°, für Sauerstoff bei 118°, für Kohlensäure bei 31° unter Null.

Da hiernach gasförmige Körper sich von Dämpfen nur dadurch unterscheiden, daß erstere den Zustand oberhalb der kritischen Temperatur, letztere unter derselben darstellen, so folgt, daß ein gasförmiger Körper nur dann zu einer Flüssigkeit kondensiert werden kann, wenn die Temperatur unter den kritischen Punkt herabgebracht wird; sie haben dann im gesättigten Zustand eine geringere Dichte als ihre Flüssigkeit. Da der Druck eines gesättigten Dampfes um so höher ist, je höher die Temperatur, bei der Verflüssigung aber dieser überwunden werden muß, so folgt, daß zur Kondensation ein um so höherer Druck notwendig ist, je höher die Temperatur ist. Der höchste Druck, durch welchen überhaupt eine Verflüssigung möglich ist, ist bei oder dicht unter der kritischen Temperatur erforderlich; je tiefer die Temperatur herabgedrückt wird, mit desto geringerem Druck ist die Verflüssigung möglich.

Schon früher, ehe man die Kenntnis von der kritischen Temperatur gewonnen hatte, wußte man, daß gewisse, unter gewöhnlichen Umständen, also bei atmosphärischem Druck und äußerer Temperatur gasförmige Körper durch die vereinte Wirkung von Druck und Abkühlung verflüssigt werden konnten. Für die Abkühlung hatte man aber früher nur verhältnismäßig wenig wirkungsvolle Hilfsmittel, nämlich die Winterkälte und die schon lange bekannte Kältemischung Schnee mit Kochsalz, durch welche eine Temperatur bis 32° C. unter 0 erzeugt

werden kann. Nachdem es aber gelungen war, durch diese Mittel in Verbindung mit Druck Kohlensäure zu verflüssigen, fand man, daß diese flüssige Kohlensäure bei plötzlicher Ausdehnung durch Druckentlastung sich so weit abkühlt, daß ein Teil zu einer schneeartigen Masse, dem Kohlensäureschnee, erstarrt, der eine Temperatur von — 79° hat. Hiermit war ein vorzügliches neues Abkühlungsmittel gewonnen; Faraday wandte dasselbe zuerst zu seinen Verflüssigungsversuchen an. Für die Erzeugung der hohen Drucke für Kondensation von Gasen dienen meist gewöhnliche mechanische Mittel, nämlich die Luftdruckpumpe.

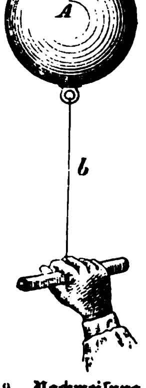
Faraday gelang, wie schon vorn angedeutet, die Verflüssigung der meisten Gase; einige derselben konnte er sogar in den festen Zustand überführen. Es widerstanden der Verflüssigung nur noch wenige Gase, darunter Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff (und auch Luft, die Mischung von Sauerstoff und Stickstoff), bei denen dieselbe auch bei den höchsten Drucken (bis zu 1000 Atmosphären) und den bis dahin zu erzielenden tiefsten Abkühlungen nicht erreicht wurde. Dies gelang, wie schon oben erwähnt, fast gleichzeitig Ende 1877 Cailletet in Paris und Raoul Pictet in Genf und zwar für Sauerstoff, Stickstoff, Luft und Kohlenoxyd, dagegen noch immer nicht für Wasserstoff. Über die gelungenen Versuche gingen am selben Tage die Berichte bei der Pariser Akademie der Wissenschaften ein. Beide kamen unabhängig voneinander und auf verschiedenem Wege zum Ziel. Das Verfahren Cailletets beruht darauf, daß bei plötzlicher Druckentlastung eines schon mit anderen Mitteln möglichst weit abgekühlten und stark komprimierten Gases durch die sofort eintretende Verdunstung eine weitere sehr starke Abkühlung stattfindet; wenn hierbei die kritische Temperatur unterschritten wird, dann kondensiert ein Teil des Gases. Auf diese Weise erhielt er bei unter 300 Atmosphären Druck stehendem und auf — 29° abgekühltem Sauerstoff, wobei derselbe noch gasförmig geblieben war, nach plötzlicher Verringerung des Druckes einen Nebel aus flüssigem Sauerstoff. Pictet dagegen gewann die Gase als direkte zusammenhängende tropfbare Flüssigkeit im engeren Sinne. Er umschloß ein Rohr, das Sauerstoff unter hohem Druck enthielt, mit flüssiger Kohlensäure, deren Herstellung ja schon seit längerer Zeit keine Schwierigkeiten machte; diese Kohlensäure ließ er unter geringem Druck verdunsten und dabei wurde die nötige Verdampfungswärme dem Sauerstoff entzogen, die hierdurch unter den kritischen Punkt abgekühlt wurde. Auf diese Weise verflüssigte Pictet, sowie später Linde, die atmosphärische Luft zu einer glänzenden hellblauen Flüssigkeit. Dagegen gelang es Cailletet und Pictet noch nicht, den Wasserstoff zu verflüssigen, weil nicht die erforderliche Temperaturerniedrigung erzielt werden konnte; letzterer will zwar bei seinen Versuchen das Entstehen eines feinen Nebels aus Wasserstoff beobachtet haben, doch ist die Richtigkeit dieser Beobachtung bestritten worden, und auch bis jetzt ist die Überführung des Wasserstoffs zu einer statischen, tropfbaren Flüssigkeit nicht erreicht worden. Wie wir aber noch sehen werden, ist dies nicht nur theoretisch möglich, sondern nach einem ganz neuen, sehr einfachen Verfahren von Linde höchst wahrscheinlich auch praktisch ausführbar.

Der englische Physiker Professor Dewar hat mit Hilfe eines ausgezeichneten Apparates die von Cailletet und Pictet zuerst ausgeführte Verflüssigung der Luft in größerem Maßstabe wiederholt. Es ist ihm durch seine vortrefflichen Einrichtungen gelungen, mehrere Liter flüssiger Luft herzustellen. Durch eine geistreiche Idee hat er es fertig gebracht, die in einem Gefäße enthaltene verdichtete, flüssige Luft fast vollkommen gegen Wärmezufuhr zu isolieren, so daß dieselbe in offenen Gefäßen bei gewöhnlichem Luftdruck längere Zeit flüssig erhalten werden konnte, während sonst naturgemäß verflüssigte Luft, ebenso wie Sauerstoff und Wasserstoff wegen ihres sehr niedrigen Siedepunktes nur bei dem hohen Verflüssigungsdruck flüssig gehalten werden kann. Die sonst übliche Wärmeisolierung, wie Umhüllung mit Filz, Watte und sonstigen für andere Zwecke mit bestem Erfolg angewendeten Wärmeschutzmassen erwiesen sich als vollkommen wirkungslos; bei der großen Temperaturdifferenz zwischen der äußeren Umgebung und dem flüssigen Gase findet stets eine so große Wärmeübertragung an letzteres statt, daß dasselbe, sobald es von dem hohen Verflüssigungsdruck entlastet wird, unter lebhaftem Kochen in kurzer Zeit wieder in den gasförmigen Zustand übergeht. Dewar verwandte nun Glasgefäße mit doppelten bis dreifachen Wandungen; aus den Zwischenräumen entfernte er mittels einer vorzüglichen Quecksilberluftpumpe jeden Wärmeleiter, indem er einen fast absolut luftleeren Raum schaffte. Das absolute Vakuum ist aber auch absoluter Nichtleiter der Wärme, also die vollkommenste Wärmeisolation. In dergestalt isolierten Gefäßen bleibt Sauerstoff ohne Druck bei einer Temperatur von 180° C. unter Null längere Zeit flüssig; nur allmählich findet eine Verdunstung statt. Dewar machte mit solchen doppelwandigen Gefäßen in Vorträgen verschiedene glänzende Experimente; Alkohol, der bekanntlich wegen seines niedrigen Gefrierpunktes zum Messen von sehr niedrigen Temperaturen benutzt wird, gefror in dem Zwischenraume des doppelwandigen Gefäßes sofort zu einer harten, festen Masse, die durch Berührung mit einer Flamme sich nicht entzündet.

Um auch noch die geringe Wärmestrahlung durch die Glaswände von dem inneren, gegen Wärmeleitung auf die beschriebene Art isolierten Gefäße abzuhalten, brauchte Professor Dewar den Kunstgriff, in den Zwischenraum der Glaswände eine geringe Menge Quecksilber zu bringen: bei dem fast absoluten Vakuum füllt sich der Raum mit einem feinen Quecksilberdampf. Sobald das innere Gefäß mit der flüssigen Luft oder dem flüssigen Sauerstoff gefüllt wurde, kondensierte sich dieser bei der außerordentlichen Kälte auf der Außenseite des inneren Gefäßes und bildete auf derselben einen feinen, spiegelnden Quecksilberniederschlag, welcher

ebenso, wie ein gewöhnlicher Spiegel die Lichtstrahlen, die von außen kommenden Wärmestrahlen reflektiert. Dewar hat ein derartiges, mit flüssiger Luft gefülltes Gefäß, in schneeförmige Kohlensäure verpackt, von London nach Cambridge transportiert; dies bedeutet dasselbe, als wenn man Eis in siedendes Wasser eingepackt erhalten und verschicken wollte, denn der Temperaturunterschied zwischen der flüssigen Luft und der festen Kohlensäure ist ebenso groß, wie zwischen Eis und kochendem Wasser.

In neuerer Zeit ist die Verflüssigung von Gasen aus dem Stadium des wissenschaftlichen Experimentes herausgetreten und zur praktischen technischen Ausnutzung übergegangen; schon seit längerer Zeit wird flüssige Kohlensäure im technischen Großbetriebe hergestellt; sie bildet jetzt einen Handelsartikel und wird vielfach zu den verschiedensten Zwecken angewendet. In den letzten Jahren ist man auch zur Herstellung flüssigen Sauerstoffs in größerem Maßstabe übergegangen; besonders der durch seine in wissenschaftlicher und technischer Beziehung bedeutsamen Arbeiten und Erfolge auf diesem Gebiete, wie auf dem verwandten der künstlichen Kälteerzeugung (z. B. Eisfabrikation) berühmt gewordene deutsche Maschinenfabrikant Professor Linde zu München hat hierfür technische Verfahren ausgebildet. Insbesondere sei hier auf das neueste hingewiesen. Es beruht auf dem längst bekannten Prinzip, daß ein unter Druck stehendes Gas bei Verringerung der Spannung sich abkühlt (weil ein Teil der Wärme zur inneren Ausdehnungsarbeit verbraucht wird), aber in Verbindung mit einem Gegenstromapparat, vermittelst dessen die abgekühlte Luft der in einem zweiten Behälter befindlichen gepreßten Wärme entzieht. Näheres darüber (samt Abbildung) im Abschnitt „Wärme". So ist es Linde gelungen, ohne Anwendung von Kältemischungen und hohen Drucken, ohne andere Hilfsmittel als die mechanische Arbeit, die für die Erhaltung der Druckdifferenz nötig ist, durch einen einfachen kontinuierlichen Kreisprozeß viele Liter flüssige Luft zu erzeugen, und ebenso muß es möglich sein, schließlich auch Wasserstoff als Flüssigkeit zu erhalten.



9. Nachweisung der Trägheit.

Trägheit und die Kraft.

Jeder in Ruhe oder in einmal angenommener geradliniger, gleichförmiger Bewegung begriffene Körper behält seinen Zustand, also die Ruhe oder Bewegung, unverändert bei, solange nicht durch äußere Veranlassung eine Zustandsänderung bewirkt wird. Dieser auf Erfahrung beruhende Satz heißt der Satz von der Trägheit oder dem Beharrungsvermögen der Körper. Wenn man von einem in schneller Fahrt begriffenen Wagen abspringen will, so muß dies mit einer gewissen Geschicklichkeit geschehen, sonst wird man zu Boden geworfen; wenn ein Kahn mit einiger Heftigkeit gegen eine Anlegebrücke fährt, so können leicht die in ihm stehenden Personen auf einmal übereinanderpurzeln. Ein Versuch zur Demonstrierung des Trägheitsgesetzes ist folgender: Man hängt eine Kugel A (Abb. 9) an einem dünnen Faden a auf, der sie eben trägt; an der Kugel ist ein weiteres Stück Faden b von genau derselben Stärke befestigt. Zieht man nun mittels eines Querholzes an letzterem langsam und allmählich stärker nach unten, so zerreißt natürlich das Fadenende a, da dieses außer dem Zug schon das Gewicht der Kugel auszuhalten hat. Bei einem kräftigen Ruck an dem Querholz aber zerreißt jedesmal b, nicht a; ja es werden sogar 2 Fäden derselben Stärke unterhalb der Kugel zusammen zerreißen, und nicht der eine über der Kugel, obwohl an diesem noch das Gewicht hängt; richtiger, weil das Gewicht vorhanden ist. Dieses müßte nämlich, ehe der Ruck auf den oberen Faden übertragen werden und diesen zerreißen könnte, entgegen der Trägheit plötzlich aus der Ruhe in Bewegung übergeführt werden. Bei allmählich stärkerem Ziehen wird das Gewicht langsam um ein kleines Maß herabgezogen, bis der obere Faden reißt; dem plötzlichen Rucke folgt die in Ruhe befindliche Kugel nicht ebenso schnell, und die unteren Fäden reißen.

Zu dem Trägheitsgesetze haben hauptsächlich die der Bewegungslehre gewidmeten frühesten Arbeiten Galileis geführt, durch welche er der Schöpfer der Dynamik geworden ist. Galilei kam aber selbst noch nicht zu einer klaren Erkenntnis und Fassung des Beharrungsgrundsatzes, obwohl seine Arbeiten mit Notwendigkeit darauf hinführten. Er wußte sich noch nicht ganz von den überlieferten Anschauungen frei zu machen, indem er noch zwischen einer natürlichen und einer gewaltsamen Bewegung unterschied, welche er allerdings ineinander überzuführen bestrebt war; er nahm an, daß einem sich wagerecht bewegenden Körper ein Antrieb mitgeteilt sei, der die Bewegung unverändert und gleichförmig unterhalte, solange nicht ein äußerer Einfluß dieselbe beeinträchtige. Hier haben wir also das Beharrungsprinzip. Bei der senkrecht nach oben gerichteten Bewegung dagegen verließ er diesen Grundgedanken und nahm an, daß der ursprüngliche Antrieb bei der Bewegung fortwährend abnehme, bis die entgegenstrebende Schwere ihm gleich werde; bei der dann folgenden Abwärtsbewegung würde der ursprüngliche, nach oben gerichtete Antrieb immer kleiner, während die Schwere gleich bliebe, wodurch die Abwärtsbewegung immer schneller würde. Der ursprüngliche Antrieb wird aber an sich nicht kleiner, sondern seine Wirkung wird allmählich aufgehoben durch den entgegengesetzten Einfluß der Schwerkraft.

Ein aus der Hand geschleuderter Stein würde nach dem Trägheitsprinzip in der geraden Richtung und mit der Geschwindigkeit, die er beim Verlassen der Hand angenommen hat, sich bis in die Unendlichkeit fortbewegen, wenn nicht andere Kräfte ihn daran hinderten. Solche entgegengesetzte Kräfte sind aber stets und überall vorhanden; es gibt keine einfache, von einem Kraftanstoß ausgehende Bewegung in der Welt. Der geschleuderte Stein muß zunächst den Widerstand der Luft überwinden; dann wirkt auf ihn von demselben Augenblick an, wo er seine Bahn beginnt, die Schwerkraft, welche ihn an tausend Fäden unablässig niederzieht, bis er im Bogen wieder zur Erde gelangt. Eine mit der größten Anfangsgeschwindigkeit abgeschossene Kanonenkugel fällt trotz ihres Beharrungsvermögens wieder zur Erde zurück. Wird eine Kugel auf einer genau horizontalen Ebene fortgerollt, so läuft sie eine Zeitlang, bleibt aber doch schließlich stehen; abgesehen von dem Luftwiderstande ist es hier die Reibung, welche der Trägheit des Körpers entgegenwirkt.

Wir haben als Ursache der Änderung der Bewegung in allen Fällen eine Kraft, und hierauf beruht die allgemeine Bestimmung des Begriffes Kraft vom Standpunkte der Mechanik: Kraft ist die Ursache einer Bewegungsveränderung. Über das eigentliche Wesen des Begriffes Kraft gibt diese Definition allerdings keine erschöpfende Erklärung; eine solche kann und wird den Bemühungen der Physiker ebenso wenig wie den Spekulationen der Philosophen jemals gelingen. Aber glücklicherweise braucht die Mechanik das Wesen der Kräfte nicht zu erkennen; für die Behandlung der mechanischen Aufgaben, die Erforschung und Nutzbarmachung der Gesetzmäßigkeiten der Wirkungen der Kräfte genügt vollkommen die vorstehende formelle Definition. Wir unterscheiden nach den Wirkungen sehr verschiedenartige Kräfte oder Naturkräfte, welche indessen, wie noch weiterhin besprochen wird, nach der modernen Auffassung alle nur verschiedene Erscheinungsformen einer einzigen Urkraft oder der Kraft schlechtweg sind. In den vorher angeführten Beispielen kommt die Schwerkraft, bei dem geschleuderten Steine die physiologische Muskelkraft, bei der Kanonenkugel die Expansivkraft der Pulvergase zur Wirkung; bei der Federkraft wirkt die Elastizität, die Kraft des Stahles, in der Gestalt einer Feder Formveränderungen durch äußere Kräfte Widerstand entgegenzusetzen und nach Aufhören dieser Kräfte die ursprüngliche Form wieder anzunehmen. Ganz anders wieder äußert sich der Magnetismus und ähnlich die Elektrizität als anziehende oder abstoßende Kraft bei gewissen Stoffen. Außer der genannten hat die Elektrizität die verschiedenartigsten Wirkungen, welche anscheinend gar nichts miteinander gemein haben und gar nicht von derselben Kraft herzurühren scheinen. Durch die elektrischen Lampen ersetzt uns die Elektrizität das Sonnenlicht; mit Hilfe zweier dünnen Drähte und eines Elektromotors überträgt sie die Kraft eines Tausende von Metern entfernten Wasserfalles; durch den elektrischen Flammenbogen können wir so hohe, auf andere Weise nicht erreichbare Hitzegrade erzeugen, um die schwerflüssigsten Metalle zu schmelzen, zu legieren und zu schweißen. Am bedeutendsten und wichtigsten im Haushalt der Natur, wie in der

Technik, ist schließlich die in der Wärme enthaltene Kraft, welche weiterhin noch besonders eingehend besprochen wird.

Für gewöhnlich denkt man bei der Bezeichnung Kraft an bewegende Kräfte, das sind solche, die befähigt sind, eine neue Bewegung hervorzurufen, oder bei schon vorhandener Bewegung, je nachdem sie im Sinne oder entgegengesetzt dem Sinne der Bewegung wirken, diese letztere beschleunigen oder verzögern können. Es gibt indessen auch Kräfte, die zu ihrer Wirksamkeit das Vorhandensein einer Bewegung zur Voraussetzung haben, also nur im stande sind, eine Verringerung einer schon vorhandenen Bewegung hervorzubringen; diese werden als Bewegungshindernisse bezeichnet. Die früher besprochenen Körpereigenschaften der Kohäsion, die auf der Anziehungskraft der Moleküle eines Körpers, und der Adhäsion, die auf der Anziehung der Materie verschiedener Körper an der Berührungsstelle beruht, sind z. B. solche Bewegungshindernisse, denn sie setzen der Trennung der Körperteilchen, bezw. der beiden Körper, also deren Bewegung voneinander einen Widerstand entgegen. Ein anderes Bewegungshindernis ist die Reibung, die in der Mechanik und Technik die größte Bedeutung besitzt und später noch näher besprochen wird.

Die Mechanik beschäftigt sich hauptsächlich mit den Kräften im gewöhnlichen Sinne oder den mechanischen Kräften, während die anderen schon erwähnten Kräfte, Magnetismus, Elektrizität, Wärme, vorzugsweise in das Gebiet der Physik gehören. In neuerer Zeit bildet indessen besonders die Wärme auch einen sehr wichtigen Gegenstand für die Mechanik, den die mechanische Wärmetheorie behandelt. Alle mechanischen Kräfte äußern sich als Zug oder Druck; jede Kraft ist bestimmt durch ihren Angriffspunkt, ihre Richtung und ihre Größe. Erstere beiden Begriffe sind ohne weiteres klar. Die Größe mechanischer Kräfte wird gemessen durch Vergleichung mit der Anziehungskraft der Erde oder Schwerkraft (worüber weiterhin näheres); letztere bewirkt, daß jeder Körper in der Ruhe einen Druck auf seine Unterlage oder einen Zug an der Schnur, an der er hängt, ausübt. Dieser Druck (bezw. Zug) heißt das Gewicht des Körpers; die Einheit desselben ist das Kilogramm und wird durch die Masse eines Kubikdezimeter oder eines Liter reinen Wassers von 4° C. dargestellt. Die Einheit der Kraft ist diejenige Kraft, welche dem Druck der Schwere eines Kilogramm das Gleichgewicht hält. Alle mechanischen Kräfte werden hiernach durch die Gewichtseinheit gemessen. So kann man z. B. die Anziehungskraft eines Magneten auf einen vorgelegten Anker direkt durch das Gewicht messen, welches eben im stande ist, den Anker abzureißen.

Wir haben hier noch den soeben erwähnten Begriff Masse zu besprechen; derselbe ist keineswegs identisch mit Gewicht, und in der Mechanik wird zwischen beiden ein scharfer Unterschied gemacht. Masse ist die in einem Körper enthaltene Menge Stoff oder Materie. Der Begriff hat also zunächst mit der Schwere nichts zu thun, aber die Masse ist proportional dem Gewicht, und es findet eine bestimmte Beziehung zwischen beiden statt; speziell ist die Einheit der Masse von der Gewichtseinheit abgeleitet, da es für erstere keine so bequeme Bestimmung gibt, wie für das Gewicht. Die Masseneinheit hat das Gewicht $\frac{1}{9,8}$ kg; die Zahl 9,8 ist die Beschleunigung der Schwerkraft pro Sekunde, die Ableitung wird weiterhin dargelegt.

Wenn eine mechanische Kraft nicht durch eine entgegengesetzte im Gleichgewicht gehalten, also aufgehoben wird, wie in dem früheren Beispiel die auf einen Körper wirkende Schwerkraft durch die Festigkeit der Unterlage, sondern einen in Ruhe befindlichen Körper in Bewegung versetzt oder einem schon bewegten Körper eine Beschleunigung erteilt, so leistet sie durch Überwindung der Trägheit Arbeit. Wenn wir einen in der Hand gehaltenen Stein loslassen, so hat er an sich nicht das Bestreben, zu fallen, sondern nach dem Prinzip der Trägheit in seiner Lage zu verbleiben. Die Schwerkraft zieht aber an dem Steine nach unten und leistet, indem sie ihn in Bewegung setzt und durch unausgesetztes Fortwirken die Schnelligkeit der Bewegung stetig vergrößert, Arbeit. Ebenso wird Arbeit geleistet, wenn ein Körper durch irgend eine Kraft, z. B. die Muskelkraft, in die Höhe geschleudert wird. Die Arbeitseinheit ist das Kilogrammmeter oder Meterkilogramm (kgm oder mkg) d. h. die Arbeit, welche zum Heben von 1 kg auf 1 m Höhe geleistet wird. Eine größere Arbeitseinheit, welche zuweilen in der Technik gebraucht

wird, ist die Metertonne (mt) = 1000 Kilogrammmeter. Die einem Körper erteilte Antriebskraft ist in demselben enthalten als Arbeitsfähigkeit, d. h. jeder in Bewegung befindliche Körper besitzt die Fähigkeit, eine ihm entgegenwirkende Kraft, einen Widerstand, zu überwinden; er leistet hierbei wieder Arbeit, wobei seine Geschwindigkeit sich verringert, und die Größe derselben bis zur vollständigen Erschöpfung der erteilten Geschwindigkeit ist genau gleich der vorherigen Antriebskraft. Diese Arbeitsfähigkeit, oder der Arbeitsvorrat, den bewegte Körper besitzen, heißt lebendige Kraft. Diese Bezeichnung führt leicht irre, da sie nach vorstehender Erklärung keine Kraft, sondern eine Arbeitsgröße darstellt; ihre Maßeinheit ist deshalb das Kilogrammmeter. Die Größe der lebendigen Kraft berechnet sich als das Produkt aus Masse und halbem Quadrat der Geschwindigkeit, letztere in Metern gemessen.

Wenn man einen Stein mit einer gewissen Kraft, z. B. mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 20 m senkrecht in die Höhe schleudert, so fällt derselbe unter dem Einflusse der Schwerkraft nach kurzer Zeit wieder zurück; ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes, also luftleeren Raum angenommen, wird der Stein, in der Lage angekommen, von der er in die Höhe geschleudert worden war, genau wieder dieselbe Geschwindigkeit, also dieselbe lebendige Kraft haben, wie im ersten Augenblicke der Aufwärtsbewegung. Wäre der Stein ein vollkommen elastischer Körper und fiele er auf eine feste, horizontale, vollkommen elastische Platte, so würde er wieder auf dieselbe Höhe wie vorher zurückschnellen, und das Spiel würde sich, immer luftleeren Raum vorausgesetzt, ohne Ende fortsetzen.

Es können aber auch nicht bewegte, in Ruhe befindliche Körper eine Arbeitsfähigkeit besitzen, und man bezeichnet allgemein die in einem Körper enthaltene Größe der Arbeit Energie. Hat man, um das frühere Beispiel fortzuführen, einen Stein vom Boden auf eine gewisse Höhe gehoben oder geschleudert, dann aber durch eine Unterstützung am Zurückfallen gehindert, so kommt die ihm durch die Aufwärtsbewegung erteilte Arbeit zunächst nicht zur Wirkung. Der Stein bleibt liegen ohne Bewegung, aber nicht ohne Arbeitsfähigkeit; die Arbeit ist nicht verloren, sondern gleichsam in dem Körper verborgen aufgespeichert, latent. Sie ist in der höheren Lage des Steines gegen früher zur Erdoberfläche begründet und kann jeden Augenblick wieder zur Wirkung kommen, wenn nämlich die Unterstützung fortgenommen wird, so daß der Stein herabfällt; er entwickelt dann wieder dieselbe lebendige Kraft oder Arbeit, die ihm beim Aufwärtswerfen erteilt wurde. Man bezeichnet deshalb die mechanische Arbeitsfähigkeit ruhender Körper als Energie der Lage oder statische oder potentielle Energie im Gegensatz zur lebendigen Kraft bewegter Körper, die Energie der Bewegung, aktuelle oder kinetische Energie genannt wird. Wie das letzte Beispiel zeigt, können beide Arten Energie ineinander übergeführt werden; die potentielle Energie des in hoher Lage befindlichen Steines verwandelt sich beim Fallen in lebendige Kraft. Beim Aufziehen einer Gewichtsuhr oder Federuhr verrichten wir durch das Heben des Gewichtes oder das Anspannen der Feder mechanische Arbeit; dieselbe wird verwendet zum Betreiben der Uhr, d. h. sie wird langsam zur Überwindung der Reibungswiderstände des Werkes aufgezehrt. Wir sehen, daß die meisten Dampfmaschinen mit mehr oder weniger schweren Schwungrädern ausgerüstet sind. Dieselben haben bekanntlich den Zweck, den Gang der Maschine zu regulieren. In den verschiedenen Stellungen des Kolbens übt dieser nämlich eine verschieden große Kraft auf die Kolbenstange und die Kurbelwelle aus und zwar abwechselnd mehr und weniger als die mittlere Leistung. Die bewegte Masse des Schwungrades nimmt nun jedes Mehr an Leistung auf und gibt es während der geringeren Leistung wieder ab, so daß die gesamte Arbeitsabgabe annähernd konstant bleibt.

In den [illegible] Begriffen Kraft und Arbeit [illegible] Ein- [illegible] ist, [illegible] mechanische Arbeit [illegible] richtig [illegible] Kraft, wenn wir [illegible] Durch [illegible] des

Faktors Zeit zu den früheren Begriffen kommen wir so zu dem Begriffe Arbeitskraft oder Leistung; häufig, besonders in der praktischen Mechanik und Technik, wird indessen die Bezeichnung Kraft selbst kurzweg in diesem Sinne gebraucht. Die Arbeitsleistung verbindet also die Arbeit mit der Zeit, und ihre Einheit, das Sekundenkilogrammmeter (skgm), enthält die Einheit der Arbeit, das Kilogrammmeter, und die Zeiteinheit, Sekunde. Ein Sekundenkilogrammmeter ist hiernach diejenige Arbeitskraft, welche in einer Sekunde 1 kgm leistet, oder 1 kg 1 m hoch hebt.

Alle erörterten Maße für Kraft und Arbeit beziehen sich auf das Heben von Gewichten, ihre Einheiten enthalten die Gewichtseinheit; sie benutzen also den Begriff der Schwerkraft. Entsprechend der ursprünglichen Definition der Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung muß natürlich auch eine allgemeine Beziehung zwischen Kraft und Arbeit zu Bewegung oder Beschleunigung festgestellt werden. Eine solche Beziehung und die Bestimmung der Einheiten danach ist sogar eigentlich näher liegend als die Zuziehung des ursprünglich mit der Kraft in keinem allgemeinen Zusammenhang stehenden Begriffs der Schwere. Die obigen Maße und Einheiten sind indessen aus praktischen Rücksichten wegen der größeren Klarheit und Handlichkeit konstruiert worden. Die natürliche allgemeine Erklärung der Einheit der Arbeitskraft ist, daß diese der Einheit der Masse in der Einheit der Zeit (Sekunde) die Einheit der Beschleunigung (1 m) erteilt. Für die Masse haben wir aber kein so einfaches und praktisch brauchbares Maß, wie beim Gewicht; die Masseneinheit wird deshalb, wie schon oben erwähnt, von der Gewichtseinheit abgeleitet und zwar aus der Beziehung, daß die Einheit der Kraft (1 kg) der Einheit der Masse in der Einheit der Zeit (1 Sekunde) die Beschleunigung von 9,8 m erteilt. Die Zahl 9,8 ist die Beschleunigung der Schwerkraft, d. h. ein frei fallender Körper erhält unter dem Einflusse der Schwerkraft (im luftleeren Raume) in einer Sekunde die Beschleunigung von 9,8 m, also nach der ersten Sekunde (vom Ruhezustande aus) eine Endgeschwindigkeit von 9,8 m; der durchfallene Raum beträgt in der ersten Sekunde 4,9 m. (Das Mittel aus der Anfangsgeschwindigkeit 0 und der Endgeschwindigkeit, da die Bewegung eine gleichmäßig beschleunigte ist; näheres hierüber in dem Kapitel „Schwere".) Die von der Krafteinheit bei 4,9 m Höhe geleistete Arbeit — gehobene oder durchfallene Höhe ist gleich — ist nach früherem 4,9 kgm; anderseits ist die in einem Körper enthaltene lebendige Kraft oder Energie, wie wir früher gesehen haben, das halbe Produkt aus Masse und aus dem Quadrat der Geschwindigkeit, also bei der Masseneinheit M und der Beschleunigung 9,8 m $\frac{1}{2}$ M . 9,8² kgm; beide Größen sollen nach obigem gleich sein, also 4,9 kgm = $\frac{1}{2}$ M . 9,8² kgm, und hieraus berechnet sich die Masseneinheit M = $\frac{1}{9{,}8}$ kg, oder ein Körper von 1 kg Gewicht enthält 9,8 Masseneinheiten.

In der Praxis wird vielfach ein größeres Maß für die Einheit der Arbeitskraft angewendet, die Pferdestärke, PS oder HP (nach dem englischen Horse-power), welche 75 skgm enthält. Dieser Begriff ist von James Watt eingeführt worden; das Maß entspricht aber keineswegs der wirklichen Kraft eines Pferdes, welche bei Arbeitspferden und 10stündiger Arbeitszeit nur etwa 40—60 skgm beträgt (vergl. Abschn. III). Die Einführung von 75 skgm als Pferdestärke beruht auf einer zufälligen Begebenheit. Eine der ersten von Watt gebauten Dampfmaschinen war für eine Brauerei zum Betriebe eines Pumpwerkes bestimmt, welches früher von Pferden betrieben worden war. Um eine möglichst leistungsfähige Maschine als Ersatz der Pferde zu erhalten, bestimmte der Brauer die Kraftleistung eines Pferdes in der Weise, daß er ein kräftiges Arbeitstier unter fortwährendem Antreiben mit Aufbietung aller Kraft 8 Stunden lang bis zur völligen Erschöpfung die Pumpe treiben ließ. Aus der hierbei geförderten Wassermenge ergab die Umrechnung eine Leistung von 75 skgm, welche, wenn auch offenbar unrichtig, seitdem eingeführt wurde und später nicht mehr aus der Technik verdrängt werden konnte. Auch für die Arbeit wird in der Praxis vielfach in unexakter Weise, wodurch leicht zu Irrtümern Veranlassung gegeben wird, die größere Einheit der Pferdestärke verwendet, und zwar bedeutet dieselbe diejenige mechanische Arbeit, welche in einer Stunde von einer Pferdestärke geleistet wird; sie beträgt also 75 . 60 . 60 = 270000 mkg. Etwas deutlicher ist die Bezeichnung Pferdekraftstunde hierfür.

Der Satz von der Erhaltung der Energie.

Die Grundlage unserer modernen Mechanik, sowie überhaupt der Lehre von den Kräften im weiteren Sinne, bildet das schon mehrfach genannte Prinzip von der Konstanz der Kraft oder, nach der exakteren Bezeichnung, von der **Erhaltung der Energie** des Weltalls.

Man findet, wie wir in der Einleitung bei einer Stelle aus den Werken von Lukrez gesehen haben, im Altertum schon Ideen, die diesem Prinzip entsprechen, welche aber mehr den philosophischen Inhalt des Satzes betrafen und nicht weiter verfolgt worden sind; er ist früher nie klar und allgemein für Naturerscheinungen aufgestellt oder bewiesen worden. Bei Cicero finden wir auch Andeutungen, indem er sagt: „der Anfang aller Bewegung liegt in dem, was durch sich selbst bewegt wird; dies kann weder entstehen noch vergehen." Wahrscheinlich hat Cicero, ebenso wie Lukrez, solche Gedanken von älteren griechischen Philosophen übernommen. **Cartesius** (Descartes), der als Maß der Kräfte die Bewegung einführte, stellte den seiner Zeit vorauseilenden Satz auf, daß die Summe der in der Welt vorhandenen Bewegung ebenso wie die Summe der Materie von Gott konstant erhalten werde, weil eine Kraft, die einen Körper verläßt, stets auf einen anderen übergehe und keine Maschine und auch nicht das Universum ihre Kraft vergrößern könne ohne einen neuen Anstoß von außen. Einen Beweis für diesen Satz lieferte Cartesius nicht; er stellte ihn vielmehr als philosophischen Grundsatz a priori auf, der einleuchtend sei und nicht bewiesen zu werden brauche. In dieser Auffassung konnte er freilich für die Naturwissenschaft auch nicht bewiesen werden, weil er die übernatürliche, also der Mechanik unzugängliche Kraft der Allmacht Gottes enthielt. Erst später, nachdem **Huyghens**, **Leibniz** und **Newton** als Bahnbrecher neuer Anschauungen aufgetreten waren, Newton die Fernwirkung von Kräften (Schwerkraft) entdeckt, Huyghens die Lehre von der Bewegung kleinster Teile als das Wesen der Kräfte aufgestellt (Undulationstheorie des Lichtes) und Leibniz durch die außerordentliche Ausbildung der mathematischen Wissenschaft, speziell die Erfindung der Differential- und Integralrechnung, Methoden geschaffen hatte, welche die Behandlung früher unlöslicher Probleme der Mechanik ermöglichte, wurden die Bestrebungen zur Erklärung der Kräftewirkungen auf wissenschaftlicher Grundlage wieder aufgenommen. Huyghens erfand zuerst das Prinzip der Erhaltung der lebendigen Kraft zur Erklärung für einen bestimmten Fall bei der Pendelbewegung. Johannes **Bernoulli** stellte darauf im Anfang des achtzehnten Jahrhunderts allgemeiner den Satz auf, daß die Summe der lebendigen Kräfte zweier Körper, welche durch Druckkräfte aufeinander wirken, konstant bleibe, und nannte diesen Satz das Prinzip von der Erhaltung der lebendigen Kraft; dasselbe wurde von **d'Alembert** bewiesen und weiter ausgearbeitet.

Hierbei handelte es sich nur um Bewegungen von Massen, die Wärme wurde nicht mit in die Betrachtung gezogen. Den Ausgangspunkt für die weitere Entwickelung bildeten die widerstrebenden Anschauungen über das Wesen des Feuers, welches Problem von jeher die Forscher angezogen hatte. Zwar hatte schon zu Anfang des siebzehnten Jahrhunderts **Baco von Verulam** die Wärme zuerst für bloße Bewegung erklärt, da durch Reibung zweier Körper stets von neuem Wärme entstehe, während doch der in den Körpern enthaltene Wärmestoff einmal zu Ende gehen müsse, doch fand seine Lehre keine Anerkennung und weitere Ausbildung. Die am Ende des siebzehnten Jahrhunderts erfolgte Erfindung der Dampfmaschine durch Papin und Savary, die in den ersten Jahrzehnten des achtzehnten Jahrhunderts bereits für praktische Zwecke mehr und mehr eingeführt wurde, forderte zu eingehenderen Forschungen über die Natur der Wärme und ihren Zusammenhang mit Bewegung und Kräftewirkungen auf, welche ja durch die Anwendung der Dampfmaschinen thatsächlich dargelegt war. Die Pariser Akademie der Wissenschaften schrieb im Jahre 1730 eine Preisarbeit aus über die Natur und die Ausbreitung des Feuers, ein gewiß zeitgemäßes Thema von größter Bedeutung. Obwohl **Cartesius** und **Boyle** bereits vorher Arbeiten veröffentlicht hatten, in denen die Bewegungsnatur des Feuers nachgewiesen werden sollte, behielt aber bei dieser Preisfrage die

alte Lehre die Oberhand. Alle Lösungen beruhten auf der Stoffnatur des Feuers, und die Ansicht hiervon blieb noch ein Jahrhundert lang die herrschende. Rumford, ein in Amerika geborener Schullehrer, der in Bayern Kriegsminister und in den Grafenstand erhoben wurde, hatte am Schlusse des achtzehnten Jahrhunderts wieder diese Stofftheorie durch seine Arbeiten erschüttert; er wurde zu diesen durch die Beobachtung geführt, daß bei mechanischen Vorgängen, speziell beim Bohren von Kanonenmetall, beträchtliche Erwärmung auftrat. Mit der Stofftheorie der Wärme war dies nicht zu vereinbaren, vielmehr mußte in der Bewegung des Bohrers die Wärmequelle gesucht werden. Zu demselben Schlusse kam Davy durch den Versuch, daß zwei Eisstücke durch Aneinanderreiben zum Schmelzen kommen. Trotzdem durch diese Versuche die Unmöglichkeit, daß Wärme ein Stoff sei, nachgewiesen war, hielt doch die alte festgewurzelte Lehre noch stand. Noch 1822 schrieb Fourier, der von einem mit anziehenden und abstoßenden Kräften ausgestatteten Wärmestoff ausging, der physikalische Wirkungen hervorrufe, in dem Vorworte eines wichtigen theoretischen Werkes über die Wärme: „Was auch die Anwendung der mechanischen Theorien sein möge, sie können nicht auf die Wärmewirkung angewendet werden. Diese bilden eine besondere Klasse von Erscheinungen, welche durch die Prinzipien der Bewegung und des Gleichgewichtes nicht erklärt werden können.“ Erst zwanzig Jahre später wurde durch die Entdeckung des deutschen Arztes Robert Mayer zu Heilbronn die alte Lehre endgültig über den Haufen geworfen.



10. Jul. Robert (von) Mayer.

Robert Mayer ist geboren 1814 zu Heilbronn als Sohn eines Apothekers; er studierte Medizin in Tübingen, München und Wien und machte 1838 seine Examina. Im Jahre 1839 fuhr er als Militärarzt in holländischen Diensten nach Batavia. Durch eingehende Studien der Verbrennungstheorie und ihrer Anwendung auf die Physiologie wurde er auf anscheinend geringfügige physiologische Erscheinungen bei von ihm vorgenommenen Aderlässen an Soldaten zu Surabaja auf Java aufmerksam; er fand, daß die Farbe des Blutes der Arterien und Venen hier weniger verschieden war, als bei seinen früheren Erfahrungen in Deutschland, und er suchte und fand mit bewundernswertem klaren Blick und Scharfsinn die Ursache darin, daß in dem heißen Klima zu der Befriedigung des Wärmebedürfnisses des menschlichen Körpers eine geringere Oxydationsthätigkeit im Blute erforderlich sei als im kalten Klima. Dieser Gedanke brachte die physiologische und mechanische Arbeitsleistung mit der Wärmemenge in Verbindung und wurde der Ausgangspunkt seiner weiteren Arbeiten. Sie führten ihn an Stelle der früheren unklaren, vagen Anschauungen und Ideen zu dem begrifflich vollkommen bestimmten und klaren Satze, daß jene Größe, die unveränderlich und konstant ist, die Energie, der Arbeitsvorrat der Welt ist.

Die zuweilen gebrauchte Ausdrucksweise der Konstanz oder Erhaltung der „Kraft“ ist nicht genau; die gesamte im Weltall vorhandene und wirksame Kraft wechselt in jedem

Augenblicke; nach der Vollbringung irgend einer Arbeitsleistung ist die Ursache, die Kraft, als solche verschwunden und hat nur Arbeit von irgend einem Vorrat auf eine andere Form übertragen.

Das von Robert Mayer aufgestellte Prinzip lautet hiernach: Die Energie der Welt ist konstant. Er ging von dem alten Satze aus, daß Ursache und Wirkung gleich seien (Causa aequat effectum); es war die schon mehrfach oben als Beispiel benutzte Thatsache bekannt, daß ein aus bestimmter Höhe herabfallender Körper beim Fallen dieselbe Arbeit leisten kann, wie zum Heben desselben auf die Höhe erforderlich ist. Mayer wies nun zunächst einen Zusammenhang zwischen Arbeit und Wärme nach. Durch Arbeit kann Wärme erzeugt werden (z. B. durch Reibung) und umgekehrt aus Wärme Arbeit (Dampfmaschine); zwischen beiden Begriffen muß, so schloß Mayer, eine bestimmte konstante Beziehung bestehen. Er nannte sie die mechanische Wärmeäquivalenz und berechnete nach Versuchen das mechanische Wärmeäquivalent einer Kalorie zu 365 kgm (1 Kalorie ist die Wärmemenge, welche zum Erwärmen von 1 kg Wasser von 0° auf 1° C. erforderlich ist), d. h. zur Erzeugung von 1 Kalorie Wärme sind 365 kgm Arbeit erforderlich oder umgekehrt, 1 Kalorie leistet, in mechanische Arbeit umgesetzt, 365 kgm; beide Größen sind gleichwertig, äquivalent.

Die genannte Zahl ist durch spätere, genauere Versuche auf 425 berichtigt worden. Wärme und mechanische Arbeit können also nach ganz bestimmten Zahlenverhältnissen ineinander übergehen; sie sind Erscheinungen einer Kraft. Durch vollkommene Verbrennung von 1 kg Steinkohle kann theoretisch eine mechanische Arbeit von rund 3 Mill. kgm erzeugt werden, entsprechend der Energie eines aus 100 m herabfallenden Gewichtes von 30 000 kg. Praktisch kann von dem Äquivalent der Verbrennungswärme, wie wir im dritten Abschnitt dieses Bandes sehen werden, wegen der unvermeidlichen Energieverluste, nur ein Teil nutzbar gemacht werden.

Mayer war in seinen Arbeiten von der Wärme ausgegangen, dehnte aber das Resultat auf sämtliche Kräfte aus, auf Fallkraft, Bewegung, Wärme, Licht, Elektrizität und auch auf die chemischen Kräfte, die er alle als Erscheinungsformen einer und derselben Energie bezeichnete. Die Änderung der Energie eines Körpers (kinetischer und potentieller) kann nur durch Aufnahme von außen oder Abgabe nach außen bedingt sein; die Menge Energie, die ein Körper gewinnt oder verliert, wird genau durch Abnahme oder Zunahme an Energie in irgend welcher Form bei anderen Körpern ausgeglichen. Dies ist der Sinn des Mayerschen Prinzips.

Wir finden dasselbe schon in den früheren Beispielen des gehobenen oder in die Höhe geworfenen Steines bestätigt. Fällt eine schwere Bleikugel aus gewisser Höhe auf den Boden, so muß die bei dem Falle gesammelte lebendige Kraft irgendwo bleiben: sie wird in Wärme umgewandelt; die Bleikugel erwärmt sich und zwar bei genügender Heftigkeit des Aufschlages so stark, daß sie schmilzt. Die in den Kugelfängen der Schießstände steckenden Kugeln sind deformiert und teilweise geschmolzen. Alle Schutzvorrichtungen gegen Geschoßwirkungen, die Panzerplatten der Kriegsschiffe und Geschütztürme, die Brustwehren und Wälle, schließlich der so viel besprochene Dowesche Kugelpanzer bezwecken und bewirken mehr oder weniger eine möglichst unschädliche „Vernichtung“, d. h. Umwandlung der lebendigen Kraft der fliegenden Geschosse. Hält eine Panzerplatte den Aufprall einer Granate aus, so wird letztere zerstört; die Energie wird zur Erwärmung und Deformationsarbeit, zur Überwindung der Festigkeit des Materials des Geschosses, — oder unter Umständen des Zieles — verbraucht.

Wir haben vom Beginn des Bestehens des Weltalls ab eine feste unveränderliche Summe von Energie oder Urkraft, welche in ewigem Wechsel der Erscheinungsform ihrer Wirkungen in der organischen und unorganischen Natur kreist. Hiernach ist der vielfach gebrauchte Ausdruck Krafterzeugung unrichtig oder wenigstens ungenau, denn niemals kann durch irgend welche Mittel Kraft erzeugt werden; wir vermögen nur die vorhandenen Kräfte der Natur umzuändern, in andere Formen überzuführen und uns nutzbar zu machen. Fast alle bemerkbare Energie auf der Erde rührt von der Sonne her. Die Windkraft, die Mühlen treibt, rührt von der Sonne her, denn durch verschiedene Erwärmung

der Luft entstehen Differenzen im Luftdruck, welcher die Winde bedingt. Die Kraft des Wasserfalles, der ein Mühlenwerk treibt, ist mehrfach umgewandelte Energie der Sonne: durch die von letzterer herrührende Wärme verdunstet das Wasser des Meeres; es wird in den Wolken von den Winden fortgeführt, bis es irgendwo als Regen oder Schnee niederfällt; die Niederschläge bilden teils in die Erde versickernd und an anderen Stellen wieder hervortretend, teils oberirdisch ablaufend die Quellen, Bäche, Flüsse. Selbst die mit unseren Dampfmaschinen gewonnene Arbeit ist nichts anderes als seit Jahrtausenden aufgespeicherte Sonnenwärme. Die Steinkohlen, durch deren Verbrennung wir den gespannten Wasserdampf zum Betriebe der Dampfmaschine erzeugen, ist aus den mächtigen Wäldern einer früheren Entwickelungsperiode unseres Erdkörpers, deren Alter wir mit unserem Zeitmaße gar nicht fassen können, entstanden, und diese verdankten wieder das Entstehen der durch Jahrtausende aufeinander folgenden und absterbenden Vegetationen der Sonnenwärme und dem Sonnenlichte, welche die Trennung chemisch gebundener Atome, die Abscheidung des Kohlenstoffes aus der Kohlensäure und so den Aufbau der Pflanzen bewirkte; ihre Energie wird in der Form der chemischen Verwandtschaft als potentielle Energie aufgespeichert, welche durch die Verbindung der Kohlenstoffatome mit Sauerstoff, die Verbrennung, wieder als äußerlich wirksame Kraft auftreten kann. Die Pflanzenwelt ist auf diese Weise der wichtige Sammler der Sonnenenergie; ohne sie würde ein großer Teil der durch die Strahlung nach der Erde gelangenden Wärme alsbald durch Ausstrahlung in den kalten Weltraum wieder verloren gehen, und ohne den Pflanzenwuchs der früheren Zeiten besäßen wir kein Mittel zur künstlichen Erwärmung.

Doch dies gilt nur mit Einschränkung für unseren früheren und bisherigen Stand der Technik. Ebenso wie wir aus der potentiellen Energie der Kohlen Wärme und hierdurch nutzbare mechanische Arbeit beschaffen können, ist es ja nach dem Gesetze der Konstanz der Kraft auch möglich, aus lebendiger Kraft Wärme umzuformen. Die einfachste Art dieser Umformung wurde seit uralten Zeiten angewendet: die Hervorbringung von Feuer durch Aneinanderreiben zweier Holzstückchen. Aber für den Fall, daß in späteren Zeiten einmal der Steinkohlenvorrat der Erde erschöpft sein wird — welcher Zeitpunkt allerdings nach der Berechnung der in den jetzt schon bekannten Kohlenlagern vorhandenen Kohlenmengen, die gewiß noch lange nicht alle Vorräte in der Erde umfassen, noch in recht weiter Ferne liegt — dann wird zweifellos der nimmer ruhende Fortschritt der Technik auch die Mittel gefunden haben, die uns zur Verfügung stehenden ungeheuren Mengen von lebendiger Kraft in der Natur, die Wasserkräfte, für die allgemeine Wärmeversorgung nutzbar zu machen, wie es schon jetzt in immer ausgedehnterem Maße für die Beschaffung nutzbarer mechanischer Arbeit geschieht. Technisch ist ja das Problem längst gelöst: der durch eine Wasserkraft mittels Dynamomaschine gewonnene elektrische Strom läßt sich in einfachster Weise in Wärme überführen. Nur die Kosten der hierzu erforderlichen Anlagen und die bei der mehrfachen Energieumwandlung unvermeidlichen praktischen Verluste machen eine Anwendung in größerem Maßstabe vorläufig unmöglich; doch steht dem nichts im Wege, daß ein reicher Mann mittels Elektrizität, also eventuell mittels eines Wasserfalls, der die elektrischen Maschinen treibt, seine Wohnung heizt und seine Speisen bereitet.

Auf eine andere Weise kann lebendige Kraft in potientielle Energie umgewandelt werden durch Federn; wenn wir jetzt unter Aufwand von mechanischer Arbeit eine Feder aufziehen oder anspannen und dann feststellen, so können unsere Enkel nach hundert Jahren diese Arbeit wieder gewinnen, indem sie die Hemmung auslösen.

Robert Mayer dehnte auch seine Entdeckung auf die Umwandlung der Energie im lebenden Tierkörper aus; auch für alle physiologischen Erscheinungen hat sein Prinzip Gültigkeit. Eine besondere Lebenskraft, welche mechanische Arbeit liefern könnte und sich selbst immer wieder ersetzt, wie sie früher angenommen wurde, gibt es nicht; vielmehr rührt alle tierische — und natürlich auch menschliche — Wärme und mechanische Arbeitsleistung von der potentiellen Energie der Nahrungsmittel her, welche sich im Blute und in den Geweben mit dem eingeatmeten Sauerstoff verbinden, verbrennen und so Wärme und Arbeit liefern. Die Bewohner der kalten Zonen, Menschen, die schwere Arbeit

verrichten, brauchen deshalb mehr Nahrung als Menschen, die in heißen Gegenden wohnen oder wenig körperlich arbeiten.

Die Arbeiten Robert Mayers fanden anfangs wenig Beachtung und noch weniger Würdigung. Hervorragende Physiker der damaligen Zeit erkannten nicht die große Tragweite des neuen Prinzips, durch welches Jahrhunderte alte Probleme eine ungezwungene Lösung fanden. Die ersten beiden Abhandlungen konnten sogar nur mit Mühe veröffentlicht werden; dann wurden sie von dem einen ignoriert, von anderen scharf bekämpft. Unter den älteren leitenden Physikern fürchteten manche, daß die rein philosophisch-spekulative Richtung, welche früher die Naturwissenschaften so lange unheilvoll beeinflußt, ja beherrscht hatte, in diese wieder eindringen könnte. Kurz, es erging dem Entdecker des Prinzips, das stets mit den größten Errungenschaften aller Zeiten in einer Reihe stehen wird, eine Zeitlang wie so manchen großen Männern. Seine Grundgedanken veröffentlichte Mayer 1842 zuerst in einem kurzen Aufsatze, betitelt: „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“. Der damals leitende Physiker Professor Poggendorf verweigerte die Aufnahme derselben in die Annalen der Physik; er erschien in einer von Liebig herausgegebenen chemischen Zeitschrift; diese wurde aber von Physikern wenig gelesen, und da auch der unscheinbare Titel nichts von dem wichtigen Inhalte erraten ließ, so blieb diese erste Arbeit fast unbeachtet; ebenso erging es einer zweiten Arbeit, welche später erst der berühmte englische Physiker Tyndall zur Anerkennung brachte, für welche er aber damals keinen Verleger finden konnte, so daß er die Druckkosten selbst tragen mußte, und auch einer im Jahre 1846 an die Pariser Akademie gesandten Arbeit. Und als dann die 1847 erschienenen, weiter unten noch besprochenen Arbeiten von Joule und Helmholtz über Wärmeäquivalenz und Erhaltung der Kraft großen allseitigen Erfolg hatten, gelang es den Bemühungen Mayers nicht, seine Priorität zur Anerkennung zu bringen. Erst 1862 wurden die Leistungen Mayers zur Geltung gebracht und zwar durch Tyndall; in einem Vortrage sowie einem Werke desselben „Die Wärme als eine Art der Bewegung“ wurde Mayer volle Gerechtigkeit, und bald strömten nun, nachdem einmal durch den hochangesehenen Mann der Bann gebrochen war, von allen Seiten Ehrungen und Anerkennungen für Mayer herbei, der inzwischen Widerwärtigkeiten aller Art erlitten hatte, ja sogar eine Zeitlang (1852—53) in einer Irrenanstalt festgehalten worden war. Seine Priorität wurde, wenn auch noch mit Widerspruch, allseitig anerkannt; er wurde zum Mitgliede angesehener wissenschaftlicher Akademien, mehrfach zum Doctor honoris causa ernannt, erhielt Preise, Diplome, Medaillen und Orden.

Wenn Mayer auch nie wieder zu vollständigem geistigen Gleichgewicht gelangte, so erwachte doch jetzt von neuem sein Schaffensdrang, und er schrieb noch mehrere wichtige Arbeiten. Besonders nahm er Stellung zu dem Verhältnis der Mechanik zu Physiologie und Metaphysik; er trat dafür ein, daß die mechanischen Gesetze, die Naturwissenschaft Halt machen müßten vor der Metaphysik, dem Begriff der Seele. An Stelle der geistigen Prozesse dürften nicht die mechanischen und chemischen Veränderungen im Gehirn oder dem Nervensystem gesetzt werden; er betonte, daß neben Materie und Kraft noch selbständig die Seele existiere. In einem Vortrage auf der Naturforscherversammlung zu Innsbruck 1869 sagte er: „Treten wir aus dem Gebiete der Natur in die lebende Welt. Wenn dort die Notwendigkeit herrscht, des Gesetzes immer gleich gehende Uhr, so kommen wir jetzt in ein Reich der Zweckmäßigkeit und Schönheit, in ein Reich der [illegible] und der Freiheit. Die Grenzmarke bildet die Zahl. In der Physik ist die Zahl alles, in der Physiologie ist sie wenig, in der Metaphysik ist sie nichts.“ Robert Mayer hielt sich in seinen naturwissenschaftlichen Arbeiten von allen anderen Richtungen, besonders der Naturphilosophie fern; er hatte aber einen festen positiven christlichen Glauben. „Aus vollem, ganzem Herzen rufe ich es: eine richtige Philosophie darf und kann nichts anderes sein als eine Propädeutik für die christliche Religion“. Mayer, der 1876 den persönlichen Adelstand erhalten hatte, starb 1878 in seiner Vaterstadt; zu Stuttgart ist ihm [illegible] ein Denkmal gesetzt worden.

Fast gleichzeitig mit Mayer, ohne dessen Arbeiten zu kennen, hatte sich der hervorragende und scharfsinnige englische Physiker Joule mit demselben Problem befaßt; er veröffentlichte 1843 seine Arbeiten, welche auf [illegible] Wege [illegible], jedoch durch genauere Versuchsmethoden den Wert des mechanischen Wärmeäquivalents, der heute als richtig angenommen [illegible] zu 425 mkg bestimmten. Joule erkannte später [illegible] die Prioritätsansprüche Mayers an.

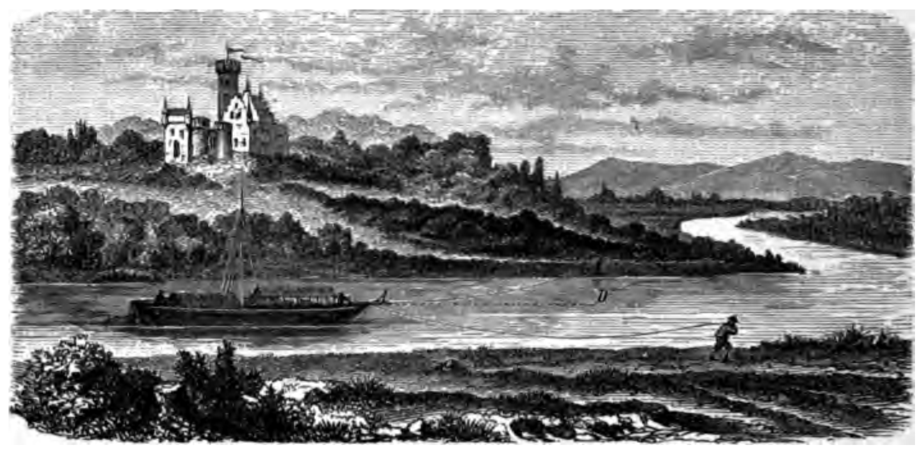
Der dritte und an Leistungen und Erfolgen hervorragendste der Begründer und Entwickeler der Grundlagen der modernen wissenschaftlichen Mechanik ist Hermann von Helmholtz, der verstorbene, bedeutendste deutsche Gelehrte unserer Zeit und mit Darwin wohl der hervorragendste Naturforscher des 19. Jahrhunderts. Helmholtz stellte in demselben Jahre wie Joule, 1847, ohne die Leistungen Mayers zu kennen, in einem „Über die Erhaltung der Kraft“ betitelten Werke auf Grundlage rein mechanischer Gesetze durch mathematische Entwickelung dasselbe Prinzip auf. Er erkannte gleich mit voller Klarheit die Bedeutung desselben für alles Geschehen in der Natur. Helmholtz hat das Prinzip der Erhaltung der Energie vorzüglich weiter ausgebildet und zur allgemeinen Anerkennung gebracht. Jetzt ist das Gesetz die Hauptgrundlage der Mechanik; es bringt sämtliche Zweige der Mechanik und Physik untereinander und diese mit der Chemie und Physiologie in Verbindung und steht in seiner universalen Bedeutung dem von Lavoisier begründeten Gesetz von der Erhaltung der Materie zur Seite. Für die Technik ist das Gesetz von der Erhaltung der Energie von größter Wichtigkeit; es gewährt ein leichteres und besseres Verständnis der Maschinen und bildet die Grundlage für die Berechnung des Wirkungsgrades.

Perpetuum mobile. Das Prinzip hat noch dadurch eine besondere Bedeutung, daß es die Unmöglichkeit der Lösung eines alten Problems, der Konstruktion eines Perpetuum mobile, beweist, einer Vorrichtung oder Maschine, die, einmal in Gang gesetzt, ohne neue Zufuhr von Energie ununterbrochen in Bewegung bleibt und arbeitet. Die Unmöglichkeit der Konstruktion einer solchen Vorrichtung liegt darin begründet, daß mit jeder Körperbewegung Reibung verbunden ist; diese verursacht durch Erwärmung und Abschleifen von Material unvermeidliche Energieverluste, die allmählich den ursprünglichen Energievorrat erschöpfen müssen. Einsichtige Männer haben zwar die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile schon längst erkannt, da dasselbe die widersinnige Wirkung ausüben müßte, Bewegung aus nichts zu erzeugen, und schon 1775 hatte die Pariser Akademie beschlossen, angebliche Lösungen dieses Problems nicht mehr anzunehmen. Aber doch wandten ohne Unterlaß Leute, darunter geschickte Meister in irgend einem mechanischen Handwerk, ihren Witz und häufig ihr Vermögen und viele Jahre Arbeit an diese widersinnige Aufgabe, wobei einige schließlich sogar den Verstand verloren. Und noch immer wieder kommen vermeintliche oder angebliche Lösungen auf; besonders die Anziehungskraft der Erde soll durch „Schwerkraftmaschinen“ ausgenutzt werden. Scheinbare Lösungen gibt es eine große Anzahl, darunter recht schön ersonnene und exakt ausgeführte. Einige solcher Apparate drehen sich unter lebhafter Bewegung ziemlich bedeutender Eisenmassen, ohne äußeren Antrieb und anscheinend ohne Einbuße von Geschwindigkeit, bis der Erfinder die Maschine anhält, „damit sie sich nicht zu sehr abnutze“. Solche Apparate sind sehr sorgfältig mit polierten Lagern und Gleitflächen ausgeführt und so konstruiert, daß wenig Reibung und damit Energieverlust stattfindet. Der Apparat wird unter Aufwendung mechanischer Arbeit, d. h. mit Ausübung einer gewissen, zuweilen beträchtlichen äußeren Kraft, in Bewegung gesetzt; die hierbei den als Schwungmassen wirkenden schweren Teilen erteilte lebendige Kraft erhält die Maschine so lange in Gang, bis der Energievorrat durch die Reibungsverluste erschöpft ist. Nach kürzerer oder längerer Zeit bleibt das Perpetuum mobile unwiderruflich stehen; an eine nutzbare Arbeitsleistung oder Abgabe von Kraft ist bei diesen Vorrichtungen natürlich gar nicht zu denken.

In einem anderen Sinne als dem gebräuchlichen freilich gibt es Lösungen des Perpetuum mobile, und solche sind seit langer Zeit in Benutzung; das sind die Maschinen zur Ausnutzung der Naturkräfte. Jedes Wasserrad stellt in diesem vernünftigen Sinne ein Perpetuum mobile dar, da es ohne Heizung oder sonstige künstliche Zuführung von Energie ununterbrochen unter Nutzleistung arbeiten kann.

Trotz der Richtigkeit des Prinzips der Erhaltung der Energie, ja sogar auf Grund desselben besteht doch die Möglichkeit, daß in unvorstellbaren, fernen Zeiten einmal alle Bewegung und jede Kraftäußerung aufhört, ja notwendig aufhören muß. Es ist ein allgemein gültiger Erfahrungssatz, daß bei jeder Kraft- und Wärmeäußerung ein Ausgleich stattfindet. Wärme geht stets nur von Körpern höherer Temperatur auf solche mit

geringerer Temperatur über; zwischen gleich warmen Körpern kann kein Wärmeaustausch und keine Wärmewirkung stattfinden. Wir empfinden beim Berühren von Gegenständen Wärme nur dann, wenn dieselben eine höhere Temperatur haben als unsere Hand, indem Wärme auf letztere übergeht, oder bei kälteren Gegenständen (als Kälte), indem umgekehrt Wärme von unserer Hand abgegeben wird. Es ist leicht einzusehen, wenn auch nicht naturwissenschaftlich exakt zu beweisen, daß auf diese Weise schließlich einmal alle Wärme im Universum sich ausgleichen muß, so daß schließlich in der ganzen Welt nur eine einzige gleichbleibende Temperatur herrscht. Ebenso beruhen alle Kraftäußerungen auf Ausgleichungen; haben sich einmal alle Kräfte oder Energien ausgeglichen, so gibt es keine Bewegung mehr. So können wir uns vom naturwissenschaftlichen Standpunkte ohne Annahme großer Katastrophen, durch logische Anwendung der Prinzipien der Mechanik, den Weltuntergang denken; denn obwohl die ursprünglich vorhandene Summe der Wärme und Energie nicht verändert wurde, kann sie doch keine Wirkungen mehr hervorbringen, und ohne Wärmewirkung und Bewegung gibt es kein Leben, die gesamte Natur ist tot. Der Zeitpunkt hierfür liegt aber so unendlich fern, daß wir uns von der Zeit bis dahin überhaupt keine Vorstellung machen können; denn die noch nicht ausgeglichenen Wärme- und Energiemengen des Weltalls, also der disponible Vorrat wirksamer Kräfte, sind unfaßbar groß: die Erde hat in 2000 Jahren ihre Temperatur noch nicht um $^1/_{100}$ Grad geändert.



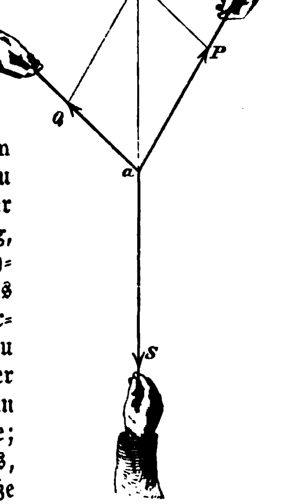
11. Wirkungsweise zweier Kräfte auf die Richtung der Bewegung.

Die Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften.

Wie bei jeder Bewegung von einer Richtung gesprochen werden kann, so hat auch jede Kraft eine Richtung und zwar diejenige, in welcher der von der Kraft beeinflußte Körper sich fortbewegt oder, wenn er durch andere äußere Kräfte oder Widerstände verhindert wird, sich fortzubewegen, sich bewegen würde, wenn diese Widerstände nicht vorhanden wären. Hierbei ist der einfachste Fall zu Grunde gelegt, daß der Körper nur ein materieller Punkt sei, oder daß die Kraft bei dem Körper auf den Schwerpunkt wirkt. Wenn eine Kraft nicht zentral, sondern seitlich auf einen Körper wirkt, so wird die Sache gleich komplizierter, indem zu der Bewegung in der Richtung der Kraft noch eine Drehbewegung hinzutritt. Nun haben wir aber zu untersuchen, was geschieht, wenn zwei oder mehrere Kräfte gleichzeitig auf einen Körper wirken. Wenn dieselben an einem Punkte und in derselben Richtung wirken, so ist es ohne weiteres klar, daß der Effekt der Summe beider oder aller Kräfte entspricht. Wenn zwei Kräfte zwar in derselben Richtungslinie, aber in entgegengesetztem Sinne z. B. eine ziehend, die andere drückend wirken, dann heben sich dieselben zum Teil auf, und nur die Differenz kommt zur Geltung; die Richtung dieser übrigbleibenden Kraft ist diejenige der größeren von beiden. Bei mehr als zwei Kräften, die teils gleich, teils gerade entgegengesetzt gerichtet sind, ist

es dasselbe, als wenn es nur zwei Kräfte wären, deren eine gleich der Summe der nach der einen, die andere der der Einzelkräfte nach der anderen Richtung ist.

Wie aber gestaltet sich die Sache, wenn die Richtungen zweier Kräfte, die auf denselben Punkt wirken, einen Winkel miteinander bilden, wie es häufig vorkommt? Betrachten wir zunächst einen praktischen Fall. Zwei Männer ziehen, längs des Ufers gehend, an Seilen ein Schiff flußaufwärts. Jeder Mann übt in der Richtung des Taues eine Zugkraft auf das Schiff aus; dieses aber bewegt sich unter der gemeinschaftlichen Einwirkung der beiden Kräfte in einer Linie A D zwischen ihren Richtungen (Abb. 11). Untersuchen wir nun mit Hilfe der Abb. 12, wie groß die aus den beiden ursprünglichen, in der Richtung a P und a Q wirkenden Kräften, welche Seitenkräfte oder Komponenten genannt werden, sich ergebende Gesamtkraft, Mittelkraft oder Resultierende wird, und wie ihre Richtung bestimmt wird. Es ist leicht einzusehen, daß sie nicht gleich der Summe beider Kräfte sein kann; je weiter diese auseinandergehen, desto kleiner wird die Resultierende, bis sie gleich 0 oder der Differenz beider Komponenten wird, wenn die Richtungen a P und a Q eine gerade Linie bilden. Um aus der Abbildung die Größe der Resultierenden zu bestimmen, haben wir zuerst darzulegen, wie auf graphischem Wege, d. h. durch Zeichnung Größen dargestellt werden. Dies geschieht seit Simon Stevinus (16. Jahrh.) in der Weise, daß man die Größen der Kraft als Längen von Linien aufträgt und zwar in einem beliebigen Verhältnis; z. B. kann man die Zugkraft von 1 kg als 1 mm, oder als 1 cm oder in irgend einem Maße ausdrücken. Legen wir z. B. zu Grunde, daß 1 kg Zugkraft gleich 2 mm sein soll, so ist in der Abbildung die eine, durch die Länge a P dargestellte Kraft = $9\frac{1}{2}$ kg, die andere a Q = $6\frac{1}{2}$ kg. Die Resultierende wird in der Richtung und Größe durch die Linie a R, die Diagonale des aus den Linien a P und a Q vervollständigten Parallelogramms dargestellt, sie ist also = 11,5 kg; um ihr das Gleichgewicht zu halten, muß eine ebenso große Kraft a S in entgegengesetzter Richtung angreifen. Nach dieser Konstruktion bezeichnet man das wichtige Gesetz als das **Parallelogramm der Kräfte**; wir verdanken seine Aufstellung demselben Simon Stevinus, der auch zuerst die sinnreiche Methode erfunden hat, die Größe der Kräfte durch gerade, ihrer Richtung parallel laufende Linien auszudrücken. Wenn beide Kräfte gleich groß sind, so liegt die resultierende Kraft in der Richtung genau in der Mitte; bei ungleichen Kräften liegt die Richtung der Resultierenden mehr nach der größeren von beiden Seitenkräften.



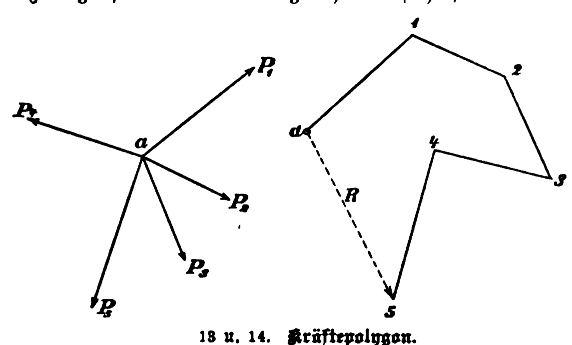
12. Kräfteparallelogramm.

Aus der geometrischen Figur des Parallelogramms der Kräfte läßt sich die Größe der Resultierenden, sowie die Richtung derselben, d. h. die Winkel, welche sie mit den Richtungen der ursprünglichen Einzelkräfte bildet, auch einfach rechnerisch bestimmen, und in der Praxis werden meist Kräfte ohne Zeichnung rechnerisch zusammengesetzt. Für mehr als zwei Kräfte gilt das Gesetz ebenfalls; man bildet zuerst aus zweien die Resultierende, die in der Wirkung nach Größe und Richtung beide vertritt; diese setzt man mit einer dritten zusammen u. s. w., bis alle Kräfte vorgenommen sind. Die zuletzt erhaltene Kraft ist die Resultierende aller ursprünglichen Einzelkräfte. Hierauf beruht das **Kräftepolygon**, Abb. 13 u. 14; um mehrere an einem Punkte a angreifende Kräfte P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 zusammenzusetzen, braucht man nämlich nur von dem Endpunkte einer eine parallele und gleichlange Linie zu einer zweiten zu ziehen, z. B. Fig. 13 durch den Endpunkt von P_1 die Parallele und Gleiche zu P_2 1—2; hierauf weiter durch den Endpunkt 2 die Parallele und Gleiche 2—3 zu P_3, u. s. w. 3—4 zu P_4, 4—5 zu P_5. Den zuletzt erhaltenen Endpunkt verbindet man mit dem Angriffspunkt, und diese Linie R ist die Resultierende aller Kräfte. Wäre der Endpunkt der Parallelen und Gleichen mit der letzten Kraft, also

4—5, in den Angriffspunkt zurückgefallen, das Polygon also in sich geschlossen, so hätte sich keine Resultierende R bilden lassen, d. h. die Kräfte wären in sich im Gleichgewicht gewesen, hätten sich gegenseitig aufgehoben.

Eine auf einen Punkt eines starren Körpers wirkende Kraft pflanzt sich über den Angriffspunkt hinaus in gerader Linie fort; man kann den Angriffspunkt in der Richtung der Kraft beliebig verschieben, ohne an ihrer Wirkung etwas zu ändern. Wenn daher auf einen Körper zwei oder mehr Kräfte an verschiedenen Punkten angreifen, die in der Richtungslinie der Kräfte selbst liegen, so verschiebt man für die Bildung der Resultierenden die Kräfte nach einem gemeinschaftlichen Angriffspunkt, worauf sie ohne weiteres durch Addition bezw. Subtraktion zusammengesetzt werden. Auch wenn zwei Kräfte in verschiedenen Richtungen an verschiedenen Angriffspunkten auf einen starren Körper wirken, verschiebt man sie in ihren Richtungen, bis sie sich schneiden; den Schnittpunkt nimmt man als Angriffspunkt beider Kräfte an, die man alsdann nach dem Parallelogramm zusammensetzt. Wenn der Schnittpunkt der beiden Kräfte, also auch nach der Zusammensetzung der Angriffspunkt der Resultierenden außerhalb des Körpers fällt, so verschiebt man die Resultierende wieder in ihrer Richtung so weit, bis ihr Angriffspunkt in den Körper fällt.

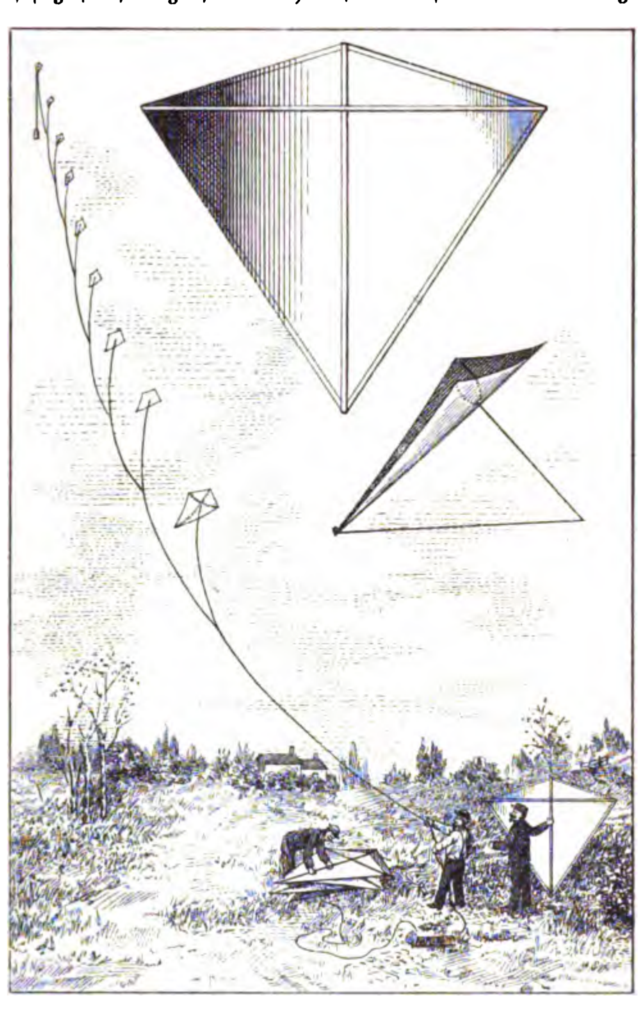
Ebenso wie man zwei gegebene Kräfte zu einer Resultierenden zusammensetzen kann, so kann man auch eine gegebene Kraft in zwei Komponenten nach beliebigen Richtungen zerlegen, indem man umgekehrt verfährt, wie bei der Zusammensetzung. Man zieht von dem Angriffspunkte Linien in der Richtung der Seitenkräfte und von dem Endpunkte der gegebenen Kraft Parallele zu diesen Richtungen; wo diese letztere schneiden, sind die Endpunkte der Komponenten, die zusammen die ursprüngliche Kraft ersetzen und an deren Stelle gesetzt werden können.



13 u. 14. Kräftepolygon.

Dies wird in der Mechanik häufig notwendig, wenn Kräfte nicht in ihrer ursprünglichen Richtung zur Wirksamkeit kommen. Wird z. B. eine Zugkraft auf einen Körper ausgeübt, der diesem Zuge nicht in seiner Richtung folgen kann, weil er sich durch Führungen nur in einer bestimmten Richtung bewegen kann (wie beispielsweise ein Wagen zwischen einem Schienengeleise), so kommt nur ein Teil der Kraft für die Bewegung zur Geltung; die Kraft zerlegt sich nach dem Parallelogramm der Kräfte in zwei Komponenten, von denen die eine in der Richtung der Bewegung, die andere senkrecht dazu wirkt; erstere wird für die Bewegung nutzbar, letztere erzeugt nur einen Druck des Körpers gegen die Gleitfläche — also beim Eisenbahnwagen die Radbandage gegen die Schiene — und geht für den beabsichtigten Zweck verloren. Ist die Richtung einer Kraft senkrecht zu einer beabsichtigten Bewegung, so kann überhaupt keine Bewegung durch dieselbe erzeugt werden. Das Aufsteigen des altbekannten Kinderspielzeuges, des Papierdrachens, beruht auf der Zerlegung der Windkraft. Der Drachen wird bekanntlich mittels zweier oder dreier Schnüre so an der Halteleine befestigt, daß seine Fläche unter einem gewissen Winkel schräg zur Vertikalen steht; der Druck des Windes auf diese schräge Fläche zerlegt sich so, daß eine nach oben gerichtete Komponente entsteht, die die Einwirkung der Schwerkraft aufhebt, also den Drachen in der Schwebe hält, oder noch höher steigen läßt, und eine zweite Komponente, die in der Richtung der Halteleine wirkt und den bekannten Zug in dieser hervorruft. Seit längerer Zeit sind diese Spielzeuge auch zu wissenschaftlichen Zwecken benutzt worden, nämlich, um verschiedenartige Beobachtungen in den höheren Luftschichten anzustellen. Schon Benjamin Franklin, der Erfinder des Blitzableiters, hat mit Hilfe derselben seine wichtigen Versuche über die Elektrizität der Wolken ausgeführt. Neuerdings sind große Drachen verwendet worden, um selbstregistrierende Apparate zu

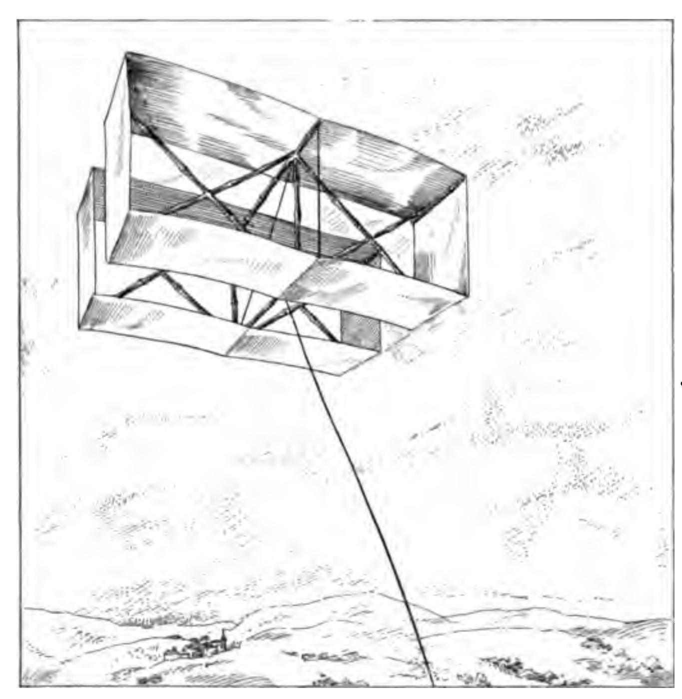
Messungen von Temperatur und Feuchtigkeit in die höheren Luftschichten emporzutragen. Es sind Höhen bis über 2800 m auf diese Weise erreicht worden, doch glaubt man, in noch größere Höhen emporzudringen. Es werden möglichst dünne, leichte und doch feste seidene Halteleinen hierbei verwendet, noch besser hat sich aber Klavierdraht bewährt. Um das Gewicht der Leine aufzuheben, läßt der Amerikaner William A. Eddy die Schnur durch eine Anzahl besonderer Drachen, gleichsam die Gehilfen des obersten Hauptdrachen, an welchem die Instrumente befestigt sind, tragen, wodurch dieser entlastet wird. Er trägt für jede beliebige Höhe nur das gleichbleibende Gewicht der Leine bis zum nächsten Hilfsdrachen, dieser wieder die Schnur bis zum folgenden u. s. w. Die Abb. 15 zeigt diese originelle und geistreiche Anordnung. Der abgebildete Drachen mit trapezoider Form ist ein malaiischer; Eddy fand diese von der unserigen in Form, Befestigung der Leine und Durchbiegung beim Fliegen verschiedenen Drachen als eine der besten. Eine andere Form ist der sogenannte Hargrave-Drachen, der sich besonders durch seine Stabilität auszeichnet und bei den erwähnten wissenschaftlichen Untersuchungen auf Blue Hill (Massachusetts) besonders bei Windgeschwindigkeiten von großer Verschiedenheit und Windstößen sehr gute Dienste leistete. Er weicht von der üblichen Drachenform vollständig ab, besteht nämlich aus vier ebenen Flächen und kann kaum besser beschrieben werden, denn als eine flache Schachtel aus Tuch, ohne Grundflächen (Abb. 16).



15. Eddys Luftuntersuchung.

Ebenso beruht die Ausnutzung der Windkraft durch die Windmühlen auf der Zerlegung der Kräfte nach dem Kräfteparallelogramm. Noch ein anderes Beispiel sei hier besprochen. Die meisten sind wohl schon auf einer Schiffsfähre — Ponte nennt man sie am Rhein, wo sie vielfach zur Verbindung der beiden Ufer in Anwendung sind — über einen Strom gefahren, und wohl sehr viele sind sich darüber nicht klar geworden, durch welche Kraft das große Fahrzeug, welches keine Maschinen, Schraube oder Schaufelräder hat, auch nicht an einem Tau hin und hergezogen wird, quer durch den Strom fährt. Der Führer desselben hat wohl auf Befragen meist auch keine genügende Aufklärung geben können: er weiß nur, wie er die Kettentrommeln zu bedienen hat, die die Fähre halten; wie die Kraft des Flusses, denn diese allein ist es, die die Bewegung hervorbringt, zur Wirkung kommt, weiß er nicht und ist ihm auch gleichgültig. Die Fähre

liegt an einer langen Kette, die stromaufwärts mitten im Fluß verankert ist. Die Kette teilt sich, wie die Halteleine des Papierdrachens, in zwei Zweige, die in den Schiffskörper hineingehen und hier auf Windetrommeln befestigt sind. Durch diese Trommeln kann man von oben aus die beiden Zweige der Kette verlängern oder verkürzen, die Längsachse des Fahrzeuges also in der einen oder anderen Richtung schief zu der Richtung der Hauptkette und der Strömungsrichtung stellen. Die Kraft des schief gegen die Längsseite des Fahrzeuges drückenden strömenden Wassers zerlegt sich nun in zwei Komponenten, von denen die eine als Zugspannung von der verankerten Haltekette aufgenommen wird, die andere aber quer zur Richtung des Stromes wirkt und die Fähre an der Haltekette im Bogen um den Verankerungspunkt herum forttreibt und zwar in der einen oder der anderen Richtung, je nachdem das Fahrzeug durch die Ketten schief gestellt ist. Es wird also auf diese Weise der Strom vom Menschen gezwungen, seine Kraft zur Erzeugung zweier ganz entgegengesetzter Arbeiten herzugeben; immer mehr gewinnt der Mensch durch Erkenntnis der mechanischen Gesetze die Herrschaft über die Naturkräfte, welche er früher fürchtete und, da er sie nicht begreifen konnte und zu bändigen wußte, zu Gottheiten erhob.



16. Hargrave-Drachen.

Das Parallelogramm der Kräfte ist die Grundlage für die rechnerische Behandlung der meisten in der Mechanik vorkommenden Kräfte; die meisten noch so verwickelten Probleme von mechanischen Kraftwirkungen lassen sich, allerdings häufig nur auf kompliziertem Wege, mit Überwindung großer Schwierigkeiten in der Erkenntnis und der mathematischen Entwickelung, in letzter Linie auf dieses Gesetz zurückführen.

Statisches Moment, Hebelgesetz. Wir haben bisher angenommen, daß die Kräfte auf frei bewegliche Punkte wirken, daß also die Bewegungsrichtung mit derjenigen der Kräfte bezw. deren Resultierenden zusammenfällt. Wesentlich anders gestaltet sich die Sache, wenn der Punkt, auf welchen eine Kraft wirkt, nicht in der Richtung der Kraft frei beweglich, sondern mit einem anderen Punkte fest verbunden ist derart, daß er sich nur um diesen drehen kann; dieser feste Punkt heißt der Drehpunkt, und eine Senkrechte von demselben auf die Kraftrichtung nennt man den Arm der Kraft. Das Produkt aus Kraft und Kraftarm heißt das statische Moment oder Drehmoment der Kraft und gibt das Maß der Kraft an, welche den beweglichen um den festen Punkt zu drehen bestrebt ist. Nach dem Drehungssinn haben wir rechtsdrehende Momente, in dem Sinne der Bewegung des Uhrzeigers, und umgekehrt linksdrehende Momente.

Die Gleichgewichtsbedingung für mehrere auf einen Punkt oder Körper wirkende im selben und entgegengesetzten Sinne drehende Momente ist, daß die Summe der in dem einen Sinne wirkenden statischen Momente gleich sei der Summe der entgegengesetzten.

Sind beide Summen nicht gleich, so verbleibt ein resultierendes Moment gleich der Differenz beider Summen, und der Drehungssinn des resultierenden Momentes ist derjenige der größeren Summe. Hierauf beruht das Hebelgesetz in seiner allgemeinen Form, dessen Anwendung noch weiterhin näher besprochen wird. Das Hebelgesetz ist eines der wenigen mechanischen Gesetze, mit welchen schon die Alten, z. B. Archimedes, vertraut waren. Den einfachsten Fall haben wir beim geradlinigen Hebel, einer festen, als gewichtslos betrachteten Stange, die um einen festen Punkt drehbar ist, und an welcher in verschiedenen Punkten senkrecht zu ihrer Richtung Kräfte in verschiedenem Sinne angreifen. Gleichgewicht ist hierbei nach vorstehendem Satze vorhanden, wenn die Summe der rechtsdrehenden Momente — also der Produkte aus den Kräften mit ihren senkrechten Entfernungen von dem Drehpunkte, den Hebelarmen — gleich der Summe der linksdrehenden Momente ist.

Parallele Kräfte, Kräftepaare. Die vorher besprochene Zusammensetzung von Kräften nach dem Parallelogramm bezog sich nur auf Kräfte, deren Richtungen divergieren, so daß sie sich in einem Punkte schneiden. Bei parallelen Kräften ist diese Konstruktion nicht anwendbar; hier benutzen wir für die Zusammensetzung den Satz von den statischen Momenten. Wenn zwei parallele Kräfte an verschiedenen Punkten eines Körpers in gleichem Sinne wirken, so setzen sie sich zu einer Resultierenden zusammen gleich ihrer Summe und von gleicher Richtung. Ihr Angriffspunkt liegt auf der Verbindungslinie der Angriffspunkte der Einzelkräfte und zwar so, daß ihre statischen Momente in Bezug auf diesen Punkt gleich sind; daß also die Entfernungen desselben von den beiden Angriffspunkten sich umgekehrt verhalten, wie die zugehörigen Einzelkräfte. Es muß aber natürlich aus den beiden Kräften, da sie parallel und in gleicher Richtung wirken, eine Resultierende entstehen, da die Kräfte sich nicht direkt aufheben. Diese besteht in dem Druck auf den festen Drehpunkt des Körpers (bezw. des Hebels), dem Auflagerdruck, und ist gleich der Summe der beiden parallelen Kräfte und mit diesen gleich gerichtet. Zum vollständigen Gleichgewicht des Systems gehört also noch eine ihr gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete, ebenfalls im Drehpunkt angreifende Kraft, die von der Festigkeit der Unterstützung des Drehpunktes dargestellt wird, die den Auflagerdruck aufnimmt.

Wenn zwei gleich große, parallele Kräfte in entgegengesetztem Sinne auf zwei Punkte eines Körpers wirken, so bilden sie ein Kräftepaar. Solche Kräfte bilden keine Resultierende; es findet kein Druck in dem Drehpunkte, dem Mittelpunkte der Verbindungslinie beider Angriffspunkte, statt. Ein Kräftepaar erzeugt also nur eine Drehbewegung, seine Wirkung ist nur die eines statischen Momentes.

Das Trägheitsmoment. Wie wir früher gesehen haben, ist durch die Trägheit jeder bewegte Massenpunkt oder Körper bestrebt, seine Bewegung unverändert beizubehalten, und daß jede bewegte Masse eine Energie besitzt, die der Masse und dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional ist. Bei der drehenden Bewegung ist jeder rotierende Massenpunkt, durch die feste Verbindung mit dem Drehpunkt an der geradlinigen Bewegung gehindert und zur rotierenden gezwungen, bestrebt, letztere beizubehalten, und er besitzt eine gewisse Menge Energie, die proportional seiner Masse und dem Quadrate seiner Geschwindigkeit ist. Letztere aber ist wieder direkt proportional der Entfernung vom Mittelpunkt oder Drehungsradius. Hiernach bezeichnet man das Quadrat aus Masse und Quadrat der Entfernung vom Drehpunkte eines rotierenden Massenpunktes als das Trägheitsmoment desselben bezogen auf den Drehungsmittelpunkt. Bei einem rotierenden Körper haben die einzelnen Massenteilchen, aus denen er besteht, wegen ihrer verschiedenen Entfernungen von der Drehachse verschiedene Trägheitsmomente. An die Stelle der Summe derselben können wir nun eine in einem Punkte konzentrierte Masse mit einem beliebigen Abstand vom Mittelpunkte setzen, so daß das Produkt aus Masse und Quadrat des Abstandes gleich dieser Summe ist. Man nimmt nun als Abstand die Einheit (1 m) an, und hiernach ist das Trägheitsmoment eines Körpers die auf die Einheit des Abstandes von der Drehungsachse reduzierte Masse desselben.

Das Trägheitsmoment steht in einer wichtigen und einfachen Beziehung zu der Beschleunigung rotierender Körper und damit zu den auf solche wirkenden Kräften, indem

das Produkt aus Winkelbeschleunigung und Trägheitsmoment gleich dem Drehungsmoment der Kraft ist. Die soeben gegebene Definition des Trägheitsmomentes hat hiernach auch den Sinn, daß das Trägheitsmoment diejenige in einem Punkte konzentriert gedachte Masse darstellt, welche beim Abstande 1 von der Drehungsachse durch eine Kraft dieselbe Beschleunigung erhielt, wie der Körper bei den verschiedenen Abständen seiner Teile.

Die Reibung.

Durch das ganze Gebiet der Naturwissenschaft, besonders der Mechanik und hier wieder der Lehre von den Vorrichtungen und Maschinen zur Kraft- und Arbeitserzeugung zieht sich wie ein roter Faden durch das scheinbar verwickeltste Gewebe des Zusammenwirkens von Kräften und Bewegungen das von uns schon bei mehrfachen Gelegenheiten betonte, grundlegende Prinzip von der Erhaltung der Energie. Nach diesem ist streng genommen, wie wir schon gesehen haben, der soeben gebrauchte Ausdruck Arbeitserzeugung ganz unzulässig; denn eine Arbeitserzeugung kann es nie und nirgends geben, stets wird nur irgend ein Teil des Energievorrates der Natur in irgend einer Weise umgewandelt und zu einer beabsichtigten mechanischen Arbeitsleistung dienstbar gemacht, also eine Naturkraft ausgenutzt. Aber Arbeitserzeugung ist ein so allgemein gebräuchliches Wort, daß es des streng wissenschaftlichen Prinzips wegen wohl nicht abgeschafft werden wird, und wenn wir uns des richtigen Begriffes bewußt sind, dürfen wir uns auch wohl des einfachen Wortes bedienen.

Wenn nun also nach diesem Prinzip der Konstanz der Energie keine Arbeit verloren geht, wo bleibt dann der Arbeitsverlust, der ausnahmslos mit allen Umwandlungsprozessen von Kraft und Arbeit verbunden ist? Wenn die an einem Flaschenzuge hängende Last durch ein Gegengewicht am Zugseile gerade im Gleichgewicht gehalten wird, dann müßte durch den geringsten Zug mit dem kleinen Finger die Last in die Höhe gezogen werden können; eine auf horizontaler Ebene laufende Kugel müßte nicht von selbst im Laufen aufhören; bekanntlich ist beides nicht der Fall. Mit jeder Bewegung ist die Überwindung von Hindernissen verbunden, die nicht beabsichtigt sind, und welche Arbeit verzehren. Bei der Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit ist es die Wärmestrahlung und Wärmeleitung, also der unbeabsichtigte und schädliche Übergang von Wärme auf andere Körper. Bei den mechanischen Bewegungen ist es die **Reibung**, welche wir schon früher als ein Bewegungshindernis kennen gelernt haben. Bei jeder Bewegung zweier Körper aneinander findet Reibung statt, mögen die sich berührenden Flächen auch noch so glatt sein. Die Größe der Reibung hängt von verschiedenen Umständen ab; in erster Linie von der Beschaffenheit der Flächen, also der Glätte oder Rauhigkeit, dann von dem Material des Körpers, von dem Druck, unter dem die Körper aneinander gepreßt sind, und schließlich von der Art der Bewegung. Die gleitende Reibung ist im allgemeinen bedeutend größer als die rollende Reibung. Aus diesem Grunde werden gleitende Bewegungen meist so viel wie möglich vermieden. Lasten werden nicht über den Boden geschleift, sondern mittels Fuhrwerk transportiert; an Stelle der gleitenden Reibung tritt rollende Reibung des Rades auf dem Boden und der Radnabe an der Achse; beide zusammen sind viel kleiner als die Reibung beim Schleifen eines gleich großen Gewichtes auf dem Boden. Beim Transport von schweren Baumaterialien, Werksteinen, Trägern werden von den Arbeitern kurze Rollen untergelegt, wodurch die gleitende Reibung in rollende verwandelt wird; soll umgekehrt ein Wagen, der eine schräge Straße hinabfährt, gehemmt werden, so wird einem Rade ein an einer Kette befestigter Hemmschuh untergelegt, welcher das Rad an der Drehung verhindert, so daß es auf dem Schuh über den Boden rutschen muß, wodurch an Stelle der rollenden Reibung die gleitende tritt.

Man nimmt an, daß die Reibung unter sonst gleichen Bedingungen proportional dem zwischen beiden Körpern senkrecht zur Berührungsfläche herrschenden Drucke, dem sogenannten Normaldruck, dagegen unabhängig von der Größe der Reibungsfläche sei. Dieser Satz ist zwar nicht für alle Fälle und streng bewiesen, er entspricht aber im

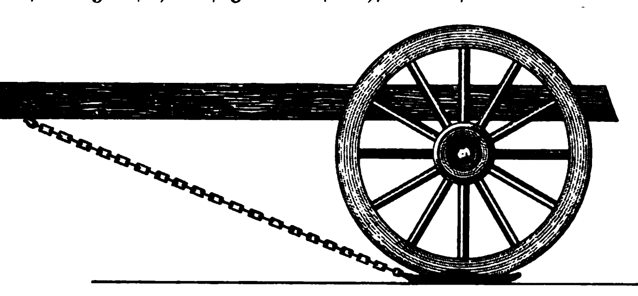
allgemeinen erfahrungsgemäß der Wirklichkeit. Daß die Fortschiebung eines schweren Körpers über eine Fläche mehr Kraft erfordert als die eines leichten, ist bekannt und leicht einzusehen; bei einem bestimmten Gewicht ist der Druck auf jede Stelle der Unterlage um so größer, je kleiner die letztere ist; es kommt also nur auf den Gesamtdruck an, nicht auf die Größe der Fläche.

Man hat für die meisten Materialien aus Versuchen zahlenmäßige Erfahrungssätze über die Größe der Reibung festgestellt, welche Reibungskoeffizienten heißen. Das Gewicht des betreffenden Körpers oder der zwischen zwei Körpern herrschende Druck multipliziert mit dem Reibungskoeffizienten gibt die Kraft an, welche erforderlich ist, die Reibung eben zu überwinden, also den einen Körper auf dem anderen eben aus seiner Ruhelage heraus fortzuziehen. Ist z. B. der Reibungskoeffizient für Schmiedeeisen auf Gußeisen 0,19, so ist zum horizontalen Fortziehen eines schmiedeeisernen, auf gußeiserner Unterlage ruhenden Körpers von 10 kg Gewicht eine Zugkraft von $0{,}19 \times 10 = 1{,}9$ kg erforderlich. Ist der Körper einmal in Bewegung, so wird der Reibungskoeffizient kleiner, und zwar um so kleiner, je schneller die Bewegung ist. Dies zeigt sich darin, daß es immer am schwersten ist, einen beladenen Wagen zuerst in Bewegung zu setzen; man sieht oft, wie Lastpferde beim Anziehen sich anstrengen müssen, während es später ganz leicht geht.



17. Rollende Reibung.

Öl, Fett und ähnliche Materialien haben einen sehr kleinen Reibungskoeffizienten; man gebraucht dieselben deshalb, um die Reibung zwischen anderen Körpern zu verringern. Hierauf beruht die im Maschinenbau sowie vielen Fällen des täglichen Lebens so wichtige Schmierung. „Wer gut schmeert, der gut fährt“ sagt ein Spruch, der besonders bei den Maschinisten beliebt ist; durch Schmierung wird viel Kraft gespart, und ohne die beste und sorgfältigste Schmierung der Achsenlager, also ohne Verwendung von Öl, Fett oder dergleichen, d. h. ohne die Eigenschaft des kleinen Reibungskoeffizienten dieser Stoffe, wären viele unserer Maschinen, z. B. die Lokomotiven, die schnelllaufenden Dampfmaschinen, die Spinnereispindeln, unmöglich, da die Wellen sich in den Lagern heiß laufen und schließlich die Lager zum Schmelzen kommen würden, was bei Vernachlässigung der Schmierung oder Verwendung ungeeigneten Schmiermaterials gar nicht selten vorkommt. Es eignet sich nicht jedes Schmiermaterial für jeden Zweck; für schnelllaufende Wellen mit kleinem Druck muß dasselbe ganz andere Eigenschaften haben als für schwere Wellen mit hohem Flächendruck. Es ist ein Unsinn, dieses oder jenes Öl als das beste für alle Zwecke zu bezeichnen; jeder erfahrene Maschinenführer weiß, daß er für die schwere Kurbelwelle einer großen Dampfmaschine ein anderes Öl verwenden muß als für die Achse einer schnelllaufenden kleinen Dynamomaschine.



18. Gleitende Reibung.

Es drängt sich nun die Frage auf, wo die von der Reibung absorbierte Kraft oder verzehrte Energie bleibt, da sie doch nicht vernichtet werden kann. Sie wird zu der Arbeit des Verschleißes, d. h. also der Zerstörung des Materials der reibenden Flächen, verbraucht und in Wärme, also unsichtbare, potentielle Energie, umgewandelt. Alle

reibenden Flächen nutzen sich mit der Zeit ab und verschleißen, wenn das Material noch so hart und die Schmierung noch so vorzüglich ist.

Auch beim Fließen von Flüssigkeiten durch Gerinne oder Röhren findet Reibung statt und zwar unter Umständen recht viel, wie wir noch in einem späteren Abschnitt über die hydraulischen Gesetze sehen werden. Selbst bei den Gasen findet Reibung statt, welche z. B. bei Gasleitungen sehr zu beachten ist. Wenn von einer Gasanstalt aus das Gas mit einem bestimmten Druck in eine lange Rohrleitung gesandt wird, so ist der Druck beim Ausströmen am Ende der Leitung geringer, und hierauf muß bei der Berechnung der städtischen Gasrohrnetze Rücksicht genommen werden.

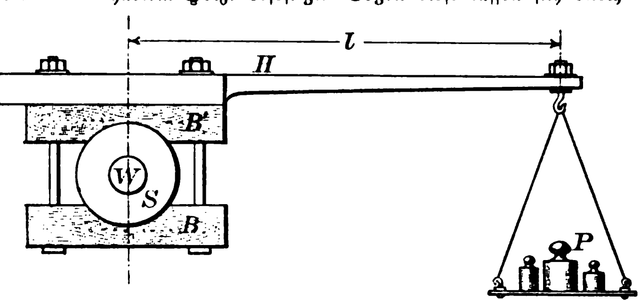
Die Reibung allein ist der Grund für die schon früher dargelegte Unmöglichkeit des Perpetuum mobile; der unvermeidliche Reibungsverlust wird von den Grüblern, die sich nutzlos um die Konstruierung eines solchen Apparates abmühen, vergessen.

Die Reibung tritt also in allen diesen Fällen als eine unvermeidliche, lästige und schädliche Erfahrung auf, aber sie hat vielfach auch ihre guten Wirkungen. Durch Reibung zweier Holzstücke haben sich nach aller Wahrscheinlichkeit die Menschen schon in den ersten Stadien der Kulturentwickelung Feuer verschafft, welches für letztere so außerordentlich wichtig war, daß die griechische Mythe die Errungenschaft des Feuers dem Halbgott Prometheus zuschrieb, der es aus dem Himmel raubte, um es den Menschen zu schenken; die Götter straften ihn für seinen Raub, indem sie ihn an einen kahlen Felsen schmieden ließen, wo er täglich von Adlern zerfleischt wurde. Die Feuerbeschaffung durch Reibung zweier Holzstücke aneinander, wie sie jetzt noch von einigen wilden Völkern geübt wird, ist im Grunde nichts anderes, als unsere Verwendung von Reibzündhölzern. Das Holz braucht nur eine viel höhere Wärme und also einen größeren Arbeitsaufwand bei der Reibung als die Zündhölzer, deren Köpfchen aus einer besonders präparierten Masse besteht, die schon bei geringerer Temperatur sich entzündet. Die Zündhölzer sind uns längst unentbehrlich geworden; wir haben uns an den Gebrauch derselben so gewöhnt, daß wir uns gar nicht vorstellen können, ohne dieselben auskommen zu können, und doch ist ihre Erfindung noch gar nicht so alt. Viele der noch lebenden Generation werden sich recht gut erinnern, wie sie früher auf umständlichem Wege mit Stahl und Feuerstein den Zunder ins Glimmen brachten und mit diesem Feuer anzündeten; in der zäh am Althergebrachten hängenden Landbevölkerung war noch im vorigen Jahrzehnt der Feuerstein und Stahl vielfach in Benutzung. Gewöhnlich wird die Erfindung der Zündhölzer dem ungarischen Chemiker Irinyi zugeschrieben, aber mit Unrecht. Das Verdienst gebührt dem deutschen Chemiker Ludwig Kammerer aus Ludwigsburg; er erfand sie im Jahre 1833, während er auf dem Hohenasperg eine Festungshaft abbüßte, die er sich mit so vielen hochherzigen deutschen Patrioten durch die Beteiligung an der politischen Bewegung in der traurigen Zeit der dreißiger Jahre zugezogen hatte. Es gelang ihm aber nicht, mit seiner wichtigen Erfindung irgend welchen Erfolg zu erringen, vielmehr wurden ihm die Verdienste derselben von kapitalkräftigeren und geschäftsgewandteren Konkurrenten entrissen, wie es so manchem Erfinder ergangen ist. Während er durch seine Erfindung einen großen neuen und blühenden Industriezweig geschaffen hatte, verbrachte er ein trauriges, freudloses und bedrängtes Leben und starb 1857 im Irrenhaus.

Die Lokomotiven ziehen die Eisenbahnzüge nur vermöge der Reibung der Triebräder an den Schienen, und die Zugleistung einer Lokomotive findet ihre Grenze da, wo die Reibung ihrer Triebräder kleiner wird als die Summe der Reibungen der Räder sämtlicher Wagen auf den Schienen und in ihren Achslagern. Die Maschinenkraft einer Lokomotive kann noch so groß sein; wenn das Gewicht der letzteren nicht groß genug ist, daß das Produkt aus Normaldruck und Reibungskoeffizient eine entsprechende Größe bekommt, so hilft die Kraft allein nichts. Wir sehen dies, wenn die Schienen durch Frost mit einer feinen Eisschicht überzogen oder glatt sind; dann fangen oft die Triebräder an, sich zu drehen, ohne daß die Lokomotive von der Stelle kommt. Da wird nun durch Aufstreuen von Sand auf die Schienen aus einem speziell für diesen Zweck bestimmten Sandtrichter die Glätte beseitigt und so die Reibung vergrößert. Auf ansteigenden Strecken, wo die Lokomotive außer der Überwindung der Reibung aller Wagenräder

auch noch das Gewicht des ganzen Zuges nach dem Gesetze der schiefen Ebene zu heben hat, reicht die Reibung der Lokomotivräder bei einer gewissen Steigung nicht mehr aus. Es müssen dann die in letzter Zeit für viele Gebirgsbahnen in Anwendung gekommenen Zahnstangen an Stelle der glatten Schienen treten, an denen die Zahnräder der Lokomotive sich voranarbeiten. Auf der Anwendung der Reibung beruht auch ein für den Maschinenbau sehr wichtiger Apparat, das **Bremsdynamometer**, nach seinem Erfinder auch **Pronyscher Zaun** genannt. Dieser Apparat hat den Zweck, durch direkte Messung die Arbeitsleistung einer Kraftmaschine festzustellen. Die Leistung vieler, wohl der meisten Kraftmaschinen kann nämlich nicht aus der Arbeit der von ihnen betriebenen Maschinen berechnet werden. Wenn eine Dampfmaschine direkt zum Betrieb einer Pumpe dient, so läßt sich ihre Nutzleistung leicht aus der Menge und der Förderhöhe des gepumpten Wassers bestimmen; dient sie aber zum Betrieb einer mechanischen Werkstatt oder einer ganzen gewerblichen Anlage mit Transmissionen, Arbeitsmaschinen, Pumpen u. s. w., so kann der Käufer nur durch direkte Messung mittels des Dynamometers feststellen, ob die Maschine die kontraktliche Kraftleistung entwickelt. Das Prinzip des Apparates ist einfach: man läßt die Maschine statt des gewöhnlichen Betriebes der Arbeitsmaschinen direkt von der Hauptwelle (Kurbelachse) aus einen Widerstand überwinden, dessen Größe gemessen wird.

Abb. 19 zeigt schematisch das Bremsdynamometer in einfachster Form. Auf der Achse W der Maschine wird eine Scheibe S aus hartem Holze befestigt. Gegen diese lassen sich durch Schrauben zwei Bremsbacken B und B¹ anpressen, an welchen der Hebelarm H befestigt ist; letzterer trägt an seinem Ende eine Schale zum Aufsetzen der Gewichte P. Die Wirkungsweise ist im Prinzip folgende. Während die Maschine sich mit der normalen Tourenzahl bewegt, zieht man bei einer gewissen Belastung der Gewichtsschale die Bremsbacken mittels der Preßschrauben an. Die Maschinenkraft muß nun die Reibung der Scheibe S an den Bremsbacken überwinden; je mehr letztere angezogen werden, desto größer wird der zu überwindende Widerstand, bis ein Punkt kommt, bei welchem durch die Reibung der Hebel mit dem Gewichte P in die Höhe gehoben wird. Ist das Gewicht zu schwer, so wird bei stärkerem Anziehen der Bremse die Maschine langsamer gehen und schließlich stehen bleiben. Die Größe des Gewichtes P und die Pressung der Bremsbacken ist nun durch Versuche so einzuregulieren, daß bei dem gewöhnlichen Gange der Maschine der Hebelarm gerade horizontal in der Schwebe gehalten wird. Die von der Maschine geleistete Kraft ist dann also gerade gleich der Kraft des Gewichtes P an dem Hebelarm l, der Entfernung von Mitte der Welle bis zum Aufhängungspunkt der Gewichtsschale. Die Größe der Pressung der Bremsbacken sowie den Reibungskoeffizienten zwischen Backen und Scheibe braucht man nicht zu kennen, denn die Größe der Reibung ist mit der Größe P.l im Gleichgewicht, kann also durch diese ersetzt werden. Aus P und l und der Tourenzahl der Maschine läßt sich rechnerisch direkt die Arbeitsleistung der Maschine feststellen. Bei den Konstruktionen und der Berechnung der Bremsdynamometer für die Praxis sind gegenüber dem obigen einfachen Schema noch verschiedene Umstände zu beobachten. Hauptsächlich kommt es dabei auf zwei Punkte an: es muß das Gewicht des Bremshebels nebst Gewichtsschale mit berücksichtigt werden, oder, wie man sich ausdrückt, die Tara der Bremse muß bestimmt werden, oder auch: dieses Gewicht wird durch einen Gegenarm ausgeglichen, so daß der Schwerpunkt der ganzen Bremse (ohne Gewichte) mit der Mitte der Achse zusammenfällt, der Hebelarm ihres Gewichtes und damit ihre Wirkung also gleich 0 wird; ferner müssen die durch die Schwankungen des Hebels bedingten Fehler ausgeglichen werden.



19. Bremsdynamometer.

Auf der Reibung der Riemen an den Riemenscheiben beruhen die Transmissionsanlagen der Fabriken: durch Reibung am Schleifstein werden die Instrumente geschärft oder gespitzt; das Polieren der Metalle, das Schleifen der Brillengläser, der Linsen für optische und photographische Zwecke beruht auf der Reibung. Der Nutzen derselben geht

aber noch viel weiter; man kann sagen, daß derselbe schließlich viel größer ist als sämtliche Nachteile, ja daß die Reibung geradezu eine Notwendigkeit in der Natur ist. Das Gehen des Menschen beruht auf der Reibung, die der Fuß bei jedem Schritt am Boden findet; ohne Reibung würden wir den hinteren Fuß beim Schreiten nicht aufheben und nach vorn setzen können, vielmehr würde jede dahingehende Muskelanstrengung nur das Zusammengleiten beider Füße nach der Mitte bewirken. Einen Beweis hierfür finden wir in der Schwierigkeit, auf einem gewichsten Parkettfußboden, auf einer glatten Eisbahn zu gehen, besonders wenn unsere Stiefel noch neue, glatte Sohlen haben. Ohne Reibung würde nicht ein Körper auf seiner Unterlage liegen bleiben können, wenn die Auflagefläche nicht ganz genau horizontal wäre; alle Berge aus nicht festgefügtem Materiale würden herabrutschen und sich gleichmäßig in der Ebene verteilen. Es würde also kein aus der Verwitterung der festen Gebirgsmassen entstehender fruchtbarer Mutterboden auf den Berghängen liegen bleiben; es gäbe in der Natur nur nackte, feste Felsen und horizontale Ebenen. Je mehr wir die Erscheinungen in der Natur näher betrachten und nicht ohne Nachdenken an den gerade vor Augen liegenden Wirkungen vorbeigehen, desto mehr erkennen wir, daß die gesamte Anordnung in der Natur eine notwendige ist; vielleicht ist alles, was uns noch zwecklos oder schädlich erscheint, für die unablässig fortschreitende Entwickelung der ganzen Welt notwendig, nicht nur im Sinne der notwendigen Folge von Wirkung auf Ursache, der Kausalität, sondern auch von dem Standpunkte eines ewigen Prinzips der Weltordnung aus, wenn wir auch mit unserem Erkenntnisvermögen, welches nur die nächsten Wirkungen erfaßt, nicht die Zweckmäßigkeit einsehen können.

Die Schwere.

Problem der Schwerkraft. Galilei und Newton. Der freie Fall. Die Wurfbewegung. Schwerpunkt. Gewicht und spezifisches Gewicht. Archimedisches Prinzip. Schwimmen. Metazentrum.

Seitdem die Naturphilosophen des Altertums begonnen haben, über die in der Natur waltenden Kräfte und ihren Zusammenhang nachzudenken, hat es zwei Jahrtausende gedauert, bis ein Forscher erkannte, daß die Schwere der Körper nicht etwas Selbstverständliches sei, sondern die Äußerung einer besonderen, allen Körpern anhaftenden Kraft, welcher es wohl verlohne näher nachzuforschen. Der Schwerkraft ist alles Körperliche auf der Erde wie in den Welträumen unterworfen; jeder Körper wird von allen anderen angezogen und zieht seinerseits alle anderen Körper an. Ebenso wie die Erde einen fallenden Stein anzieht, übt auch der Stein eine Anziehung auf die Erde aus, doch ist nur die erste Wirkung erkennbar, der Stein bewegt sich auf die Erde zu, nicht umgekehrt, weil der Stein im Verhältnis zur Erde zu unendlich klein ist, um eine erkennbare, sichtbare Wirkung auf dieselbe auszuüben zu können. Die Schwerkraft ist heute, 200 Jahre nach der Entdeckung der Gesetze ihrer Wirkung noch viel weniger in ihrem Wesen erforscht, als alle übrigen Kräfte, beispielsweise die Elektrizität, welche doch scheinbar viel kompliziertere und schwierigere Rätsel enthält. Bei allen übrigen Erscheinungen ist man, besonders in unserem Jahrhundert, durch scharfsinnige Verbindung des Experiments mit der Spekulation, der deduktiven und induktiven Forschungsmethode auf dem Wege zur Erkenntnis der Naturerscheinungen bedeutend fortgeschritten. Es ist eine Verbindung hergestellt und experimentell nachgewiesen zwischen mechanischer Arbeitskraft, Wärme, Licht, Elektrizität, Magnetismus, wir können alle diese Kräfte ineinander überführen, nur zur Schwerkraft ist noch kein Weg gefunden worden. Wir sind kaum weiter als vor 200 Jahren, indem wir nur die Gesetzmäßigkeiten kennen, nach denen sich ihre Wirkungen äußern; es ist noch keine Beziehung zwischen ihr und den anderen Naturkräften gefunden worden. Es gibt moderne Naturforscher, welche die Ansicht vertreten, daß das Problem der Schwerkraft das letzte und größte ist, mit dessen Lösung die letzte Erkenntnis aller Naturkräfte verbunden ist. Es sind, besonders in der neuesten Zeit, von berufenen, mit allem Rüstzeug der modernen Wissenschaft versehenen, scharfsinnigen Männern verschiedene Schwerkrafttheorien aufgestellt worden, aber bisher konnte noch

keine logisch und mathematisch einwandfrei durchgeführt, viel weniger experimentell bewiesen werden.

Die eigentlichen Entdecker der Schwerkraft waren Galilei und Newton; letzterer stellte zuerst die Gesetze derselben auf. Gewöhnlich wird Newton als der alleinige Entdecker genannt, aber, wie bei fast allen großen Entdeckungen, hatten doch bereits Vorgänger den Weg geöffnet.

Schon im 15. Jahrhundert hatte Vincenz von Bauvais den Satz aufgestellt, wenn ein Schacht durch den Mittelpunkt der Erde bis zur entgegengesetzten Hemisphäre getrieben und ein Stein hineingeworfen würde, so bliebe dieser im Mittelpunkte der Erde hängen, wonach der Genannte die Erkenntnis haben mußte, daß im Mittelpunkt der Erde der Sitz der auf alle irdischen Körper wirkenden Schwerkraft sei. Galilei stellte schon lange vor Newton die Fallgesetze auf. Die Aufwärtsbewegung eines in die Höhe geworfenen Körpers nimmt stetig ab; Galilei erkannte, daß dies durch die ununterbrochene Einwirkung der Schwerkraft geschieht, die den anfänglichen Auftrieb stetig verkleinert, schließlich ganz aufhebt, worauf eine Abwärtsbewegung mit stetig steigender Schnelligkeit folgt. Die von Galilei aufgestellten Gesetze für diese Bewegung sind dieselben, die wir noch heute haben. Galilei prüfte seine durch Induktion gefundenen Schlüsse durch Versuche, eine Methode, die noch jetzt allgemein angewendet wird und Galileis Arbeiten eben von allen früheren auszeichnet. Er ließ zuerst Steine von hohen Türmen fallen, z. B. dem Glockenturm zu Pisa; wegen der zu großen Geschwindigkeit des Falles war es aber nicht möglich, die zusammengehörigen Zeiten und Fallräume genau zu beobachten. Er verlangsamte deshalb die Fallgeschwindigkeit, indem er Bronzekugeln in Rinnen niederlaufen ließ, die unter bestimmtem Winkel geneigt und zur Verminderung der Reibung mit Pergament ausgekleidet waren. Da die so beobachtete Geschwindigkeit nach dem Gesetze der schiefen Ebene — zu welchem übrigens gerade diese Versuche führten — abgesehen von der Reibung in einem ganz bestimmten, von dem Neigungswinkel abhängigen Verhältnis zu der Geschwindigkeit steht, die der Körper beim freien Fall annehmen würde, so konnte Galilei letztere berechnen.



20. Isaak Newton.

Aber erst Newton erkannte 1686 das grundlegende allgemeine Gesetz der Schwerkraft. Isaak Newton wurde geboren am 5. Januar 1643 zu Woolsthorpe in England. Er studierte auf der Universität Cambridge, welche er im Alter von 18 Jahren bezog, Naturwissenschaften und Mathematik; seine günstigen Vermögensverhältnisse erlaubten ihm, mit Muße seinen Studien obzuliegen. Im Jahre 1669 wurde ihm die Professur seines verstorbenen Lehrers Barrow übertragen, welche er bis 1703 behielt, sowie weiterhin noch

andere öffentliche Ämter. Später zog er sich von dem öffentlichen Leben zurück, nachdem er schon seit 1693 seine wissenschaftlichen Forschungen aufgegeben hatte; er beschäftigte sich dann bis zu seinem Tode 1727 vorwiegend mit theologischen Studien. Newton hat schon zu Lebzeiten allgemeine Anerkennung und wohlbegründeten Ruhm erworben; aber die übertriebene Verehrung, die die Engländer ihrem Landsmanne zollen, hat dazu geführt, daß lange Zeit auch Errungenschaften seinem Verdienste zuerteilt wurden, die ihm nicht gebührten. So galt er bis in die neuere Zeit als der Erfinder der Differential- und Integralrechnung; erst neuere genauere litterarische Untersuchungen haben unzweifelhaft erwiesen, daß dem Deutschen Leibniz dieses Verdienst gebührt. Newton hatte wohl eine ähnliche Rechnungsmethode, die Fluxionsrechnung, entworfen, die aber lange nicht so vollkommen war, wie die Differentialrechnung, und von Newton selbst kaum angewendet wurde.

Einer hübschen aber sehr unwahrscheinlichen Sage zufolge soll Newton zufällig durch einen herabfallenden Apfel, auf die Schwerkraft aufmerksam geworden sein. Wahrscheinlich ist er durch die Bearbeitung der Keplerschen Lehren über die Bewegungen und Umlaufszeiten der Planeten auf seine Entdeckung geführt worden. Diese Keplerschen Gesetze, welche durch die Arbeiten Huyghens, des Dritten in der Dreizahl der bedeutenden Nachfolger Galileis, weiter entwickelt waren, entbehrten noch der Grundlage eines allgemeinen Gesetzes, nach welchem die Bewegungen bestimmt wurden; Kepler hatte dieses vergeblich gesucht, Newton fand es. Daß die Schwere in der Anziehung zweier Körper aufeinander beruht, ist schon oben gesagt und ist ja nur eine andere Bezeichnung für denselben Begriff. Das Newtonsche Gravitationsgesetz lautet: Die Intensität der Anziehungskraft zweier Körper ist proportional ihren Massen; sie nimmt ab im Verhältnis des Quadrates ihrer Entfernungen. Newton prüfte alsbald sein Gesetz an der Bewegung des Mondes und fand es bestätigt. Dann entwickelte er die Keplerschen Gesetze von der Bewegung der Planeten auf Grund des neuen Gravitationsgesetzes, und so wurde dasselbe die Grundlage der neueren mathematischen Astronomie. Auch die Erklärung von Ebbe und Flut gelang Newton vollständig. Es war jetzt ermöglicht, nicht nur durch Beobachtung der Bewegung der Sterne ihre Bahn zu konstruieren, es wurde auch möglich, auf Grund der Bewegung bekannter Sterne das Vorhandensein unbekannter anzusagen, ehe man sie gesehen, indem durch ihre Anziehungskraft bestimmte Einwirkungen auf bekannte Sternbahnen ausgeübt werden. Auf diese Weise ist beispielsweise der Neptun nach Lage und Größe vorher bestimmt und dann wirklich aufgefunden worden.

Da die Erde annähernd Kugelgestalt hat, so ist die Richtung der Schwerkraft überall nach dem Erdzentrum gerichtet; für fast alle im Leben vorkommenden praktischen Fälle kann man bei dem im Verhältnis zu allen Gegenständen auf der Erdoberfläche fast unendlich großen Krümmungsradius der Erde die Richtung der Schwerkraft an benachbarten Punkten als parallel annehmen. Eine Anwendung der Schwerkraft ist das Lot oder Senkel, welches die Bauhandwerker brauchen, um genau die Vertikale zu bestimmen; bei der Anlage von sehr langen Gebirgstunneln muß indessen schon die Nichtparallelität des Lotes auf der einen und der anderen Seite in Betracht gezogen werden. Sehr große mächtige Berge wirken auf die Schwerkraft ein, indem sie auf nahe Körper eine seitliche Anziehung ausüben, welche die Richtung der Schwerkraft, wenn auch nur ganz unbedeutend, ablenkt; diese Ablenkung kann aber nur durch die allersorgfältigsten Messungsmethoden festgestellt werden. Für alle Fälle des gewöhnlichen praktischen Lebens kommt sie nicht in Betracht. Durch Beobachtung solcher Ablenkung eines Lotes durch einen Berg in Schottland, dessen Masse man annähernd genau berechnen konnte, und dessen gleichmäßiges Gestein man kannte, so daß sein Gewicht berechnet werden konnte, hat man das Gewicht der Erde berechnet.

Da die Unterschiede des Erdradius an den verschiedenen Stellen gegen die Größe des Radius selbst ganz verschwindend klein sind, obwohl ja die Erde keine richtige Kugel, sondern an den Polen abgeplattet ist, so kann man für die gewöhnliche Praxis die Intensität der Schwerkraft für die ganze Erde als gleich annehmen, d. h. eine bestimmte Stoffmasse ist überall gleich schwer. Genau ist dies ja nicht der Fall; am Äquator, beim größten Durchmesser der Erde, also der weitesten Entfernung vom Mittelpunkte, ist die

Intensität der Schwerkraft am kleinsten. Streng genommen darf übrigens bei der Schwerkraft auch die wegen der Drehung unseres Erdballs auftretende Fliehkraft, die der Anziehungskraft entgegenwirkt, nicht vernachlässigt werden. Da sich ein Punkt des Äquators viel rascher bewegt als ein Punkt in höheren Breiten, so wird auch die Schwerkraft in verschiedenen Breiten etwas verschieden sein. Bei sehr genauen wissenschaftlichen Untersuchungen wird dies berücksichtigt; Sekundenpendel für genaue Untersuchungen müssen an Punkten der Erde mit sehr verschiedenen Breitegraden berichtigt werden. In dem folgenden Kapitel werden bei Besprechung des Pendels hierüber noch nähere Ausführungen gegeben.

Die Erscheinungen der Schwerkraft sind auf anderen Himmelskörpern sehr verschieden von denen der Erde; auf der Sonne ist die Schwerkraft 28 mal größer; man müßte, um einen Thaler zu heben, eine Kraft aufwenden, wie auf der Erde etwa für 1 kg; wir würden mit unserer Muskelkraft nur etwa 5 cm hoch springen können. Vergleichen wir dagegen die Verhältnisse auf einem bedeutend kleineren Himmelskörper, z. B. auf der Vesta; dort würden wir mit Leichtigkeit über die höchsten Häuser weghüpfen können, die Last eines mittleren irdischen Lastwagens könnten wir auf den Schultern davontragen.

Der freie Fall und die Wurfbewegung.

Während im unendlichen Weltraume, ganz außerhalb der Anziehungssphären der Himmelskörper, ein bewegter Körper sich in Ewigkeit in derselben Richtung und Geschwindigkeit fortbewegen würde, werden alle Körperbewegungen auf der Erde von der Schwerkraft beeinflußt. Alle Körper fallen im luftleeren Raume, wenn sie ohne Anstoß in beliebiger Höhe ihrer Unterstützung beraubt worden, mit gleicher Schnelligkeit nieder; eine Bleikugel, eine leichte Flaumfeder, gleichzeitig und von gleicher Höhe losgelassen, erreichen genau gleichzeitig die Erde. Die in Wirklichkeit sehr verschiedene Fallgeschwindigkeit kommt nur von dem Widerstande der Luft. Die mit dem Niederfallen eines Körpers verbundene lebendige Kraft hängt, wie schon dargelegt, von der Masse, also dem Gewicht ab; sie ist also bei schweren Körpern größer als bei leichten. Der Luftwiderstand absorbiert nun bei jeder Bewegung eines Körpers eine gewisse Menge Energie; bei einem größeren Energievorrat bedingt dieser geringe Verlust keine beträchtliche Geschwindigkeitseinbuße, bei leichten Körpern mit geringer Energie wird letztere dagegen zum großen Teil von dem Luftwiderstande verzehrt. Da Luft selbst ein bestimmtes Gewicht hat, so fallen Körper, die leichter sind als Luft, nicht zur Erde, sondern steigen im Gegenteil empor, ebenso wie ein Stück Holz, welches leichter ist als Wasser, nicht durch dieses auf den Boden niedersinkt. Daß das Gewicht gar keinen Einfluß auf die Fallgeschwindigkeit hat — abgesehen vom Luftwiderstande — zeigt der einfache Versuch, daß zwei Ziegelsteine zusammengebunden nicht schneller zu Boden fallen, als wenn sie lose nebeneinander fallen gelassen werden; schon Galilei wandte dieses Beispiel an. Durch ein einfaches Experiment läßt es sich zeigen, daß nur der Widerstand der Luft es ist, der die verschiedenen Fallgeschwindigkeiten bedingt. Man schneide ein rundes Stück Papier aus, von genau gleicher, oder etwas geringerer Größe als ein Thaler, lege es auf diesen, so daß es am Rande nirgends übersteht, und lasse den Thaler in möglichst genau horizontaler Lage fallen. Das Papierblatt fällt ebenso schnell mit; steht dasselbe dagegen ein wenig über den Rand des Geldstückes vor, so daß die Luft darunter drückt, so flattert es beim Fallen des Thalers fort.

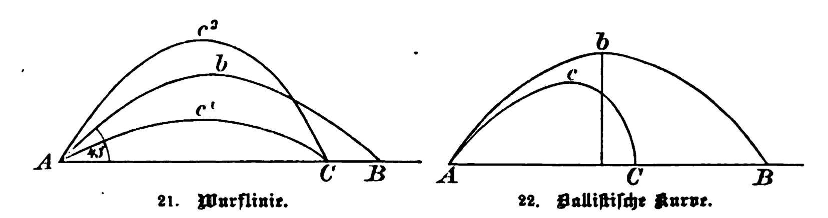
Die Fallgeschwindigkeit ist eine gleichmäßig beschleunigte; dies ist leicht einzusehen, da unaufhörlich die Schwerkraft an dem fallenden Körper zieht und so die Geschwindigkeit fortwährend vergrößert. Die Beschleunigung der Schwerkraft beträgt 9,81 m d. h. wenn ein Körper ohne Anstoß, also mit der Anfangsgeschwindigkeit 0 frei fällt, so erreicht er nach Ablauf der ersten Sekunde eine Geschwindigkeit von 9,81 m; seine Fallhöhe in dieser Zeit ist gleich der Hälfte, 4,9 m. In der zweiten Sekunde beträgt die Beschleunigung wieder 9,81 m, die Geschwindigkeit also nach der zweiten Sekunde 19,62 m; die in der zweiten Sekunde durchfallene Höhe ist $\frac{19,6 + 9,8}{2} = 14,7$ m und hiernach die ganze

Fallhöhe in zwei Sekunden 19,6 m; und so weiter. Hiernach kann man die allgemeine Regel anwenden: die Geschwindigkeit ist nach 1, 2, 3, 4 u. s. w. Sekunden gleich 1, 2, 3, 4 u. s. w. mal 9,81 m, die Fallhöhe in der 1, 2, 3, 4 u. s. w. Sekunde gleich 1, 3, 5, 7 mal 4,9 m und die ganze Fallhöhe beträgt 1×1, 2×2, 3×3, 4×4 u. s. w. mal 4,9 m. Die Zahl 9,81 und damit vorstehende Regel gilt nur für die Erde.

Beim Fall eines Körpers durch die Luft verwandelt sich die gleichmäßig beschleunigte Bewegung in eine abnehmend beschleunigte; je größer die Geschwindigkeit wird, desto größer wird auch der Luftwiderstand, und schließlich wird derselbe gleich der Beschleunigung durch die Schwere. Von diesem Augenblick wächst die Geschwindigkeit nicht mehr, der Fall erfolgt mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Dies geschieht um so eher, je leichter der Körper ist. Flaumfedern, leichter Staub, Nebel fallen von vornherein mit gleichförmiger Geschwindigkeit; auch Regen, Hagel nehmen nach einer bedeutenden Fallhöhe eine gleichmäßige Geschwindigkeit an.

Die **allgemeinen Fallgesetze**, die für alle Himmelskörper Gültigkeit haben, lauten: die Geschwindigkeiten in jedem Augenblicke verhalten sich wie die während des Falles verlaufenen Zeiten; die Fallhöhen in jeder Sekunde wachsen im Verhältnis der ungeraden Zahlen (1-, 3-, 5-, 7mal dem für den betreffenden Himmelskörper geltenden halben Werte der Fallhöhe der ersten Sekunde); die ganzen durchfallenen Höhen schließlich verhalten sich wie die Quadrate der Fallzeiten.

Die genau entgegengesetzten Verhältnisse wie beim freien Fall finden statt bei der senkrecht aufwärts gerichteten **Wurfbewegung**. Ein senkrecht steigender Körper hat dieselbe Steighöhe, wie ein frei fallender Körper in derselben Zeit Fallhöhe hat, oder:

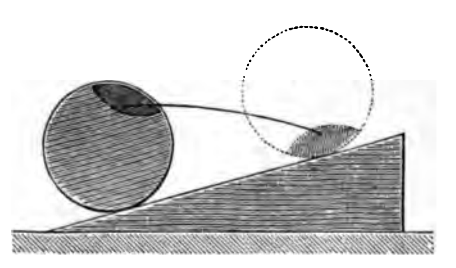


21. Wurflinie. 22. Ballistische Kurve.

die Zeit, welche ein senkrecht aufwärts geworfener Körper braucht, bis er seinen höchsten Punkt erreicht, ist ebenso lang, wie diejenige des darauf folgenden freien Falls. Man kann also dieselben Regeln des freien Falls auch für den senkrechten Wurf anwenden. Ganz anders und komplizierter werden dagegen die Verhältnisse der Wurfbewegung in anderer als senkrechter Richtung. Es sind zwar auch hier, abgesehen von dem Luftwiderstande, nur dieselben beiden Kräfte wirksam, der einmalige Kraftantrieb für die Wurfbewegung und die kontinuierlich wirkende Schwerkraft. Während aber beim senkrechten Wurf beide Kräfte genau entgegengesetzt gerichtet sind, ihre Zusammensetzung also rechnerisch einfach ist, sind für jede andere Wurfbewegung für jeden Punkt der Bahn, also jeden Moment der Flugzeit, andere Kräfteparallelogramme zu bilden.

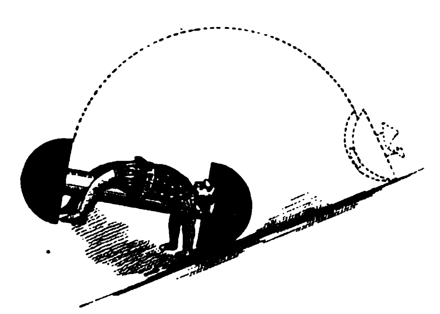
Ohne hier auf die mathematische Ableitung einzugehen, sei nur bemerkt, daß die Bahn einer Wurfbewegung ohne Luftwiderstand, also im luftleeren Raume, eine Parabel ist. Die Linien A b B, A c^1 C, A c^2 C in Abb. 21 stellen solche Wurfbahnen dar; der höchste erreichte Punkt, b, c^1, c^2 der drei verschiedenen Bahnen heißt der Kulminationspunkt, und von diesem aus ist die Bahn nach beiden Seiten gleich lang und gleich geformt, also symmetrisch. Die Steighöhe oder Elevation, sowie Länge und Form der Flugbahn hängen von der Anfangsgeschwindigkeit und dem Winkel der Anfangsrichtung gegen den Horizont, dem Steigungswinkel, ab. Die Wurfhöhe und Wurfweite wachsen im Verhältnis des Quadrates der Anfangsgeschwindigkeit. Bei einer bestimmten Anfangsgeschwindigkeit fliegt ein Körper am weitesten bei einem Steigungswinkel von 45°; bei allen übrigen Winkeln ist die Bahn kürzer, und zwar sind die Bahnen gleich bei Winkeln, die um ein gleiches Maß größer oder kleiner sind, als 45°, z. B. in Abb. 21 die Bahnen A c^2 C und A c^1 C, welche 45° + 20° = 65° bezw. 45° − 20° = 25° Steigungswinkel haben.

Die wirkliche Wurflinie, die sog. ballistische Kurve, ist durch den Einfluß des Luftwiderstandes von der theoretischen parabolischen sehr verschieden; in Abb. 22 stellt A b B eine parabolische Wurfbahn, A c C die entsprechende ballistische Kurve der Wirklichkeit dar. Durch den Luftwiderstand wird die ursprüngliche Bewegungsenergie immer kleiner, so daß die gleichbleibende Schwerkraft immer mehr zur Wirkung kommt; der absteigende Zweig der Flugbahn wird hierdurch steiler, als der aufsteigende. Die Berechnung der Flugbahnen von Geschossen ist eine besondere artilleristische Wissenschaft geworden, die Ballistik. Die Schußweiten der Geschosse aus den modernen Riesengeschützen sind fast unglaublich. Aus einer 24 cm Kruppschen Gußstahlkanone, welche seiner Zeit zur Weltausstellung nach Chicago geschickt worden ist, sind auf dem großen Schießplatze zu Meppen Schießversuche mit 215 kg schweren Geschossen gemacht worden, wobei mit 44° Steigungswinkel eine Schußweite von 20260 m erreicht wurde. Die Flugzeit betrug 70 Sekunden, die Erhebung des Geschosses 6500 m; es würde also, von Meereshöhe abgeschossen, über den höchsten Gipfel des Chimborazzo, oder von St. Didier aus abgefeuert, noch berghoch über den Montblanc hinweggeflogen sein.



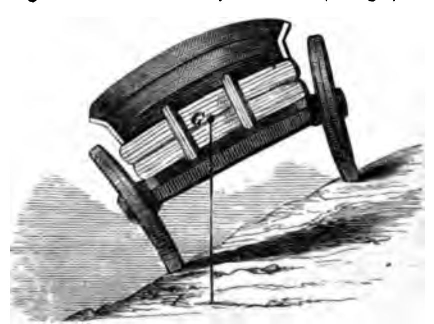
23. Gleichgewicht nicht homogener Körper.

Der Schwerpunkt. Die auf die einzelnen Teile eines Körpers wirkenden Schwerkräfte summieren sich, da sie alle gleich gerichtet sind, zu der Gesamtschwere des Körpers; bei der Zusammensetzung der einzelnen Parallelkräfte erhält man für die Resultierende einen Angriffspunkt, welcher der Schwerpunkt oder Massenmittelpunkt des Körpers heißt, an dem man die Gesamtschwere angreifend denkt. In diesem Punkte ist also gleichsam das gesamte Gewicht des Körpers vereinigt. In der Mechanik kann man alle Massenbewegungen, bei denen es sich nicht um Drehungen um eine durch den Körper gehende





24. Anwendung des labilen Gleichgewichts für Spielzeug.

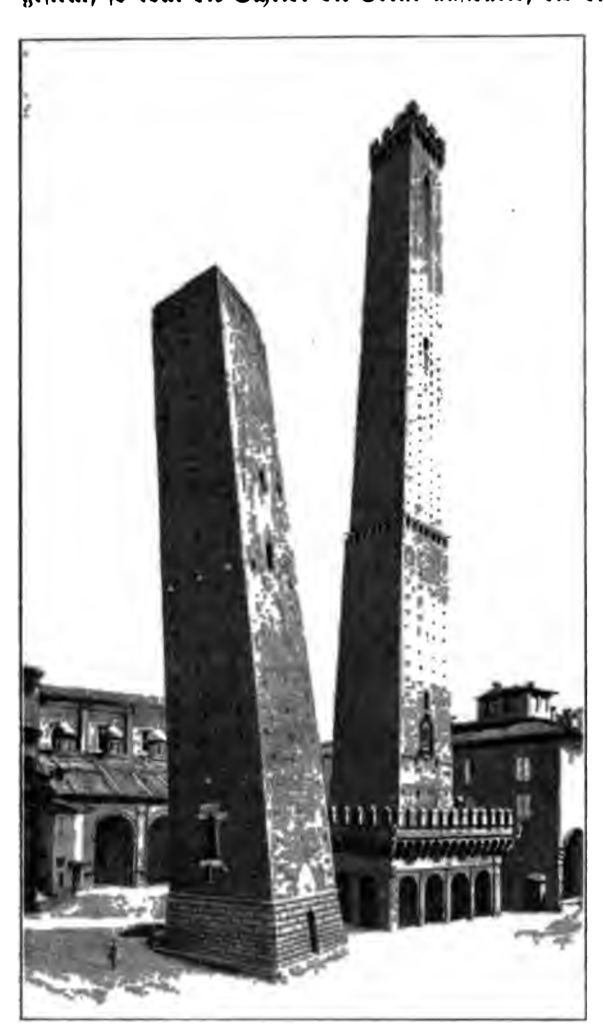


25. Genügende Unterstützung des Schwerpunktes.

Achse handelt, als Bewegung eines die Masse des Körpers enthaltenden materiellen Punktes ohne Ausdehnung behandeln, wodurch in vielen Fällen eine wesentliche Vereinfachung erzielt wird.

Wenn der Schwerpunkt unterstützt wird, befindet sich der Körper im Gleichgewicht, d. h. er verbleibt in Ruhe und kann der Schwerkraft nicht folgen; je nach der Lage des Schwerpunktes zu der Unterstützung unterscheidet man drei Gleichgewichtslagen, das labile, das stabile und das indifferente Gleichgewicht. Ein Körper ist im labilen oder beweglichen Gleichgewicht, wenn er bei einer geringen Änderung seiner Lage durch äußere Kräfte das Gleichgewicht verliert, also umfällt, wogegen er beim stabilen Gleichgewicht auch gegenüber der Einwirkung äußerer Kräfte, oder bei Änderungen seiner Lage in die frühere Gleichgewichtslage zurückkehrt. Befindet sich ein Körper in jeder beliebigen Lage im Gleichgewicht, so ist dies die indifferente Gleichgewichtslage; in derselben befindet sich z. B. eine homogene (in ihrer ganzen Masse gleichartige) Kugel auf einer genau hori-

zontalen Unterlage (in jeder beliebigen Lage liegt ihr Schwerpunkt gerade über dem Unterstützungspunkt), oder eine schwimmende Hohlkugel. Bei einem nicht homogenen Körper ist die Schwerkraft bestrebt, den schwersten Teil nach unten zu ziehen; ein im Wasser schwimmendes, an einer Stelle mit Eisen oder Blei beschwertes Stück Holz wird sich im Wasser so drehen, daß die beschwerte Stelle zu unterst ist. Wird eine runde Holzscheibe, die an einer Stelle des Randes mit Blei beschwert ist, wie in Abb. 23 dargestellt, auf eine schiefe Ebene gestellt, so rollt die Scheibe die Ebene aufwärts, bis die Bleibeschwerung die tiefste mögliche Lage erreicht hat. Das labile Gleichgewicht wird zu verschiedenen hübschen Spielzeugen verwendet. Abb. 24 zeigt eines, das besonders in Amerika beliebt ist: eine kleine Figur, welche auf einer schwach geneigten Fläche ununterbrochen abwärts Purzelbaum schlägt. Die Figur ist an einem Röhrchen befestigt, welches an beiden Enden halbrunde Scheiben trägt. In der Röhre befindet sich eine kleine Menge Quecksilber; legt man das Spielzeug auf eine geneigte Fläche, so rollt das Quecksilber nach dem tiefer liegenden Ende der Röhre und diese richtet sich infolge des Übergewichtes auf. Durch die lebendige Kraft schlägt aber das andere Ende über die Gleichgewichtslage hinaus und der Quecksilbertropfen fließt in demselben Augenblick wieder abwärts in dieses Ende u. s. w.



26. Die Türme Garisenda und Asinelli in Bologna.

Solange die Senkrechte vom Schwerpunkt eines Körpers innerhalb der Auflagefläche oder der Verbindungslinie der Unterstützungspunkte fällt, steht der Körper. Zum festen Stehen gehören mindestens drei nicht in einer geraden Linie liegende Punkte. Freilich kann ein Körper auch auf einem Unterstützungspunkte im Gleichgewichte gehalten werden, wie die Jongleure im Zirkus mit ihren auf Kopf oder Nase balancierten Flaschen, Degen und dergleichen zeigen. Der Mensch hält sich auf zwei Beinen im Gleichgewicht; dies will aber erlernt sein, und es gehört eine große Übung dazu: es ist bekanntlich eine schwierige Sache, bis kleine Kinder allein stehen und gehen gelernt haben. Und sobald wir die Unterstützung in einer ungewohnten Weise ändern, indem wir uns Stelzen an den Füßen befestigen, werden wir finden, daß es nicht so leicht ist, auf zwei Punkten das Gleichgewicht zu halten. Ein breitgebauter und niedriger Wagen kann viel schiefer stehen ohne umzufallen als ein hoher oder sehr schmaler Wagen, da bei diesem das Lot aus dem Schwerpunkte nicht mehr zwischen die beiden Räder fallen würde, wie dies bei dem Wagen in Abb. 25 noch geschieht. Die schiefen Türme von Pisa und Bologna sind

bekannt; Abb. 26 stellt einen Platz in Bologna mit zwei solchen schiefen Türmen dar, welche recht bedenklich aussehen; untersucht man aber ihre Standfestigkeit, indem man ihren Schwerpunkt sucht und von diesem das Lot auf die Erde fällt, so findet man, daß der Fußpunkt desselben noch weit innerhalb der Mauern fällt, also keine Gefahr für das Umfallen der Türme besteht. Es ist nicht ganz klar, ob diese kuriosen Bauwerke so schief gebaut worden sind als bizarre Ideen mittelalterlicher Architekten, welche etwas Originelles, für unmöglich Gehaltenes schaffen wollten, dessen Ausführbarkeit sie aber auf Grund ihrer Kenntnisse der Mechanik genau vorher bestimmt hatten; möglich ist es auch, daß die Türme von vornherein gerade gebaut worden sind und erst später, infolge einseitiger Senkungen des nicht genügend festen Untergrundes, sich „einseitig gesetzt" haben, wie der bautechnische Ausdruck lautet. Der kleinere der beiden Bologneser Türme ist gegen 1112 erbaut und nach seinem Erbauer Garisenda genannt; er ist 49 m hoch und weicht 2,4 m von der Senkrechten ab. Der größere, Asinelli genannt (ebenfalls nach seinem Erbauer), ist 97 m hoch und hängt 1,23 m über. Nach der Überlieferung waren beide Türme Festungsbauten, wie sie in den damaligen unruhigen Zeiten kriegerische Geschlechter zu Schutz und Trutz erbauten; der größere, Asinelli, wird von Touristen viel bestiegen, da man nach Ersteigung seiner 447 Stufen eine schöne Aussicht auf die Stadt, die Umgebung und die Apenninen genießt. Ein Abbrechen der Türme in einer durchgehenden Mauerfuge kann noch weniger eintreten als ein Umfallen; die gefährlichste Stelle liegt dicht über dem Boden. Betrachtet man einzelne Teile eines Turmes von irgend einer Fuge ab, so fällt das Lot aus dem Schwerpunkt des darüber liegenden Teiles immer weiter nach innen; die Standfestigkeit wird also nicht geringer, sondern größer.

Die Bestimmung des Schwerpunktes von Flächen und Körpern geschieht durch Versuche (ausnahmsweise) oder nach ganz bestimmten Verfahren auf mathematischem Wege. Bei regelmäßigen Figuren und Körpern liegt er im Mittelpunkte.

Gewicht und spezifisches Gewicht.

Das Maß für die Gewichte der Körper ist das Kilogramm mit seinen Unterabteilungen; eine größere Einheit ist noch die Tonne (t) = 1000 kg. Ein Kilogramm ist das Gewicht eines Kubikdezimeter (Liter) destillierten Wassers von + 4° C. Temperatur bei einem Luftdrucke entsprechend 760 mm Quecksilbersäule. Dies ist die genaue Bestimmung; die Temperatur von 4° C. ist deshalb gewählt, weil bei dieser das Wasser seine größte Dichtigkeit und Schwere hat. Für die alltäglichen Zwecke genügt die Erklärung: 1 kg ist das Gewicht von 1 l Wasser gewöhnlicher Temperatur, da einige Grade Temperaturunterschied oder die in der Natur vorkommenden Unterschiede im Luftdruck nur sehr geringen Einfluß auf das Gewicht haben. Wenn dies nicht der Fall wäre, dann würde das Wägen von Flüssigkeiten eine viel umständlichere Sache sein als jetzt, da jedesmal das Gewicht nach der Temperatur und dem Luftdruck umgerechnet werden müßte; für genauere Wägungen zu besonderen Zwecken geschieht das in der That.

Die gewöhnlichen und technischen Wagen werden als Anwendung der Hebelgesetze in einem späteren Kapitel dieses Abschnittes besprochen werden, während die wissenschaftlichen Wagen und das genaue Wägen in dem II. Teile dieses Bandes in einem besonderen Abschnitte ihre Behandlung finden.

Das Gewicht eines Körpers hängt ab von der in ihm enthaltenen Masse und der beschleunigenden Kraft der Schwere, d. h. der Intensität der Schwerkraft an dem Beobachtungspunkte, und ist gleich dem Produkte aus Masse und Beschleunigung der Schwerkraft. Da letztere, wie wir noch weiterhin sehen werden, an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche verschieden ist, so ist auch das Gewicht eines und desselben Körpers nicht konstant, sondern bei sehr verschiedenen Höhenlagen oder Breitegraden auf der Erde merklich verschieden. Im gewöhnlichen Leben und in der Technik hat indessen diese Verschiedenheit keine Bedeutung, da sie nur gering ist und für Wägungen in der Praxis auch dadurch verschwindet, daß ja die verwendeten Gewichte in demselben Maße beeinflußt werden, wie die zu wiegenden Körper.

Durchaus verschieden von dem Gewichte eines Körpers ist das, was man sein **spezifisches Gewicht** nennt. Darunter versteht man das Verhältnis seiner Dichte zur Dichte des destillierten Wassers bei 4° C. Temperatur, welche als Einheit angenommen wird; es ist also gar kein Gewicht im eigentlichen Sinne des Wortes, sondern eine Verhältniszahl. Die **Dichte** eines Körpers wiederum wird definiert als das Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen, d. i. seiner Größe oder seinem Rauminhalt. Die Dichte in diesem exakten wissenschaftlichen Sinne darf also nicht verwechselt werden mit dem im gewöhnlichen Leben gebräuchlichen Begriffe Dichtigkeit. Holz hat z. B. in letzterem Sinne eine größere Dichtigkeit als Sand oder Kies, der aus vielen einzelnen mit Zwischenräumen lose zusammengelagerten Teilchen besteht; trotzdem hat ein bestimmtes Volumen Sand eine größere Dichte und ein größeres spezifisches Gewicht als ein fester Holzblock von gleichem Rauminhalt, weil Sand eben mehr Masse hat.

Als Einheit gilt, wie schon erwähnt, die Dichte und das spezifische Gewicht des Wassers, doch nur für feste und flüssige Körper. Bei gasförmigen Körpern würden die Verhältniszahlen, bezogen auf Wasser, zu kleine unbequeme Werte annehmen; man hat deshalb für Gase den Wasserstoff oder auch die atmosphärische Luft als Einheit für die spezifischen Gewichte festgesetzt.

Durch den oben dargelegten Zusammenhang zwischen Dichte und Gewicht haben wir auch eine direkte einfache Beziehung zwischen dem spezifischen Gewichte und dem Gewichte der Körper. Hiernach können wir praktisch, mit Übergehung des Begriffes der Dichte, das spezifische Gewicht eines Körpers als das Verhältnis seines Gewichtes zu dem Gewichte eines gleich großen Volumens destillierten Wassers von 4° C. bezeichnen: ein Körper von dem spezifischen Gewichte 5 ist fünfmal so schwer als ein gleich großes Volumen Wasser; da 1 cbdcm des letzteren die Masse von 1 kg enthält oder 1 kg wiegt, so wiegt der Körper bei 1 cbdcm Inhalt 5 kg. Oder umgekehrt, hat ein Körper ein Gewicht von 3 kg und ein Volumen von 2 cbdcm, so ist sein spezifisches Gewicht $^3/_2$ oder 1,5.

Nachstehend sind die spezifischen Gewichte einiger im praktischen Leben häufiger vorkommenden Körper aufgeführt:

Körper	Spez. Gew.	Körper	Spez. Gew.
Gußeisen	7,25	Silber	10,1—10,6
Schmiedeeisen	7,6	Steine, Quarz, Sandstein, Granit, Basalt	2,50—2,80
Stahl	7,82—7,87	Lehmige Erde	1,90—2,10
Blei	11,6	Sandige Erde	1,30—1,60
Quecksilber	13,6—14,0	Sand	1,60—1,90
Kupfer	8,8—8,9	Ziegelmauerwerk	1,50—1,60
Messing	8,40	Trockene Nadelhölzer im Durchschnitt	0,55
Zinn	7,30	Trockene Laubhölzer im Durchschnitt	0,66
Zink	6,80—7,00		
Gold	19,3		

Der Begriff des spezifischen Gewichtes ist schon von **Archimedes** aufgestellt worden, und zwar wird hierüber von Vitruv folgende hübsche Sage berichtet. Der König Hiero von Syrakus ließ seine goldene Krone umarbeiten und übergab dem Goldschmied hierzu eine bestimmte Menge Goldes. Nachdem dieser ihm die Krone zurückgeliefert hatte, überkam den König das Mißtrauen, ob der Goldschmied nicht vielleicht unredlicherweise einen Teil des Goldes für sich behalten und dafür im Innern ein minderwertiges Metall eingefügt habe; das richtige Gewicht konnte die Krone hierbei doch noch haben. Bei der Untersuchung sollte die Krone natürlich nicht beschädigt werden, um das Innere zu untersuchen. Die Hofgelehrten des Königs wußten keinen Rat in dieser schwierigen Sache, und so wurde der ob seiner großen mechanischen Kenntnisse damals schon in hohem Ansehen stehende Archimedes berufen, um ein Gutachten abzugeben. Aber auch diesem war eine derartige Aufgabe in seiner Praxis noch nicht vorgekommen, ein Ding zu untersuchen, ohne das Innere sehen zu können. Er sann unablässig darüber nach, und beim Baden soll ihm die Erleuchtung gekommen sein: als er in die beinahe gefüllte Wanne stieg, lief diese über; damit hatte er die Lösung des Problems gefunden, und er lief, ohne sich vorher anzukleiden, unter dem Rufe Heureka, Heureka! (Ich hab's, Ich hab's!) nach Hause. Er hatte nämlich die Idee des spezifischen Gewichtes und die Anwendung desselben für Volumen-

bestimmungen erfaßt. Jeder Körper verdrängt, in Wasser getaucht, genau so viel Wasser, wie er Volumen hat. Wenn also ein Gefäß vor dem Eintauchen eines Körpers bis zum Rande voll Wasser ist, so ist nach dem leicht zu messenden überlaufenden Wasser das Volumen des eingetauchten Körpers zu bestimmen; ebenso kann dieses geschehen, indem bei einem Glasgefäße durch genaue Marken in der Wand das Steigen des Wassers und danach der Mehrinhalt bestimmt wird. Archimedes konnte also auf diese Weise das ohne Beschädigung sonst nicht zu bestimmende Volumen der Krone feststellen; aus diesem und dem absoluten Gewicht war leicht die Verhältniszahl, die wir spezifisches Gewicht nennen, zu bestimmen. Dies mußte dieselbe Zahl ergeben wie die entsprechende Bestimmung mit einem Barren reinen Goldes. Wurde als das spezifische Gewicht der Krone eine kleinere als diese Zahl (19,3) gefunden, so war leichteres, minderwertiges Metall bei derselben verwendet worden, da das Gold damals der schwerste bekannte Körper war.

Der Berichterstatter dieser Erzählung fügt zu, daß Archimedes über seine Entdeckung so erfreut war, daß er dem Zeus zum Dank ein Opfer von 100 Ochsen darbrachte, und man sagt, daß aus diesem Grunde noch heute die Ochsen jedesmal zittern, sobald eine neue Wahrheit entdeckt wird.

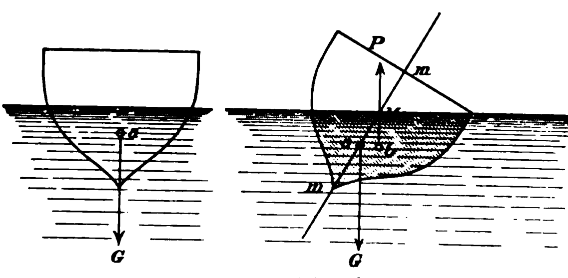
Zu demselben Ziele, der Bestimmung des spezifischen Gewichtes eines Körpers, kann man auch auf andere Weise kommen. Wenn ein Körper zuerst genau gewogen, dann am Wagebalken hängend, in Wasser getaucht wird, so verliert er genau so viel an Gewicht, wie der reziproke Wert (der Bruch 1 dividiert durch die betreffende Zahl) des spezifischen Gewichtes angibt. Also ein Stück Eisen verliert $\frac{1}{7,5}$ seines Gewichtes. Der Grund hierfür ist leicht einzusehen. Der an der Wage hängende, in das Wasser tauchende Körper verdrängt sein Volumen an Wasser; das Wasser steigt also in dem Gefäße, der Inhalt des Gefäßes wird schwerer, und um ebenso viel leichter muß der Körper geworden sein. Oder: in ein genau zum Überlaufen gefülltes Gefäß wird der Körper hineingelegt, dann wird so viel Wasser auslaufen, wie das Volumen des Körpers beträgt; das Gewicht des Inhaltes des Gefäßes nimmt also um das Gewicht des Körpers, vermindert um das Gewicht des überlaufenden Wassers, zu. Diese Erscheinung heißt das **Archimedische Prinzip**, und dasselbe lautet: Jeder Körper verliert in einer Flüssigkeit so viel von seinem Gewichte, als das Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge beträgt. Man nennt dasselbe auch das Gesetz des hydrostatischen **Auftriebs**, indem man annehmen kann, daß das elastische Wasser dem Drucke des eingetauchten Körpers einen Gegendruck von unten nach oben, den Auftrieb, entgegensetzt. Derselbe hängt nur von dem Volumen, nicht von dem Gewichte des Körpers ab; er beträgt also bei Würfeln von 1 ccm Größe aus Gold, oder Eisen oder Holz gleichmäßig ein Gramm. Hier, mit dem **Holz**, kommen wir aber wieder auf eine andere Erscheinung. Das spezifische Gewicht des Holzes ist kleiner als 1, d. h. es ist leichter als Wasser, es beträgt bei den verschiedenen Holzsorten etwa 0,54—0,90 (einige wenige schwere Holzsorten sind schwerer als Wasser, z. B. Ebenholz); wie kann nun also 1 ccm Holz mehr an Gewicht verlieren, als es selbst wiegt? Hier finden wir den Begriff des **Schwimmens**. Das Holz taucht eben nicht mit seiner ganzen Masse in das Wasser ein, sondern nur so weit, daß so viel Wasser verdrängt wird, als es wiegt. Hiermit ist das Stück Holz gewichtslos geworden und schwimmt auf dem Wasser; es ist gleichsam überschüssiger Auftrieb vorhanden, der durch den über dem Wasser hervorragenden Teil des Holzes dargestellt wird. Man kann es durch andere Körper um so viel beschweren, als dieser überschüssige Auftrieb beträgt, bis das Holz eben ganz eintaucht. Taucht man ein Stück Holz ganz ins Wasser,


27. Freischwimmender Körper.

so macht sich der Auftrieb als ein senkrechter Druck nach oben bemerkbar; sobald man das Holz frei gibt, steigt es, demselben folgend, an die Oberfläche.

Der menschliche Körper hat im allgemeinen fast genau das Gewicht eines gleich großen Volumen Wassers, meist ist er ein wenig leichter; er schwimmt also gerade an der Oberfläche, wobei noch ein kleiner Teil des Körpers über Wasser bleibt. Hiernach könnte ein Mensch, wenn er sich, wie in Abb. 27 dargestellt, ganz ruhig im Wasser verhält, nicht ertrinken, indem Mund und Nase über Wasser bleiben. In der Wirklichkeit hilft aber diese theoretische Thatsache nichts, indem der Mensch in der Angst der Lebensgefahr eben die ruhige Lage nicht beibehält, sondern durch heftige Bewegungen das Gleichgewicht stört und so häufig mit dem Kopf unter Wasser gerät.

Bei einem auf dem Wasser schwimmenden Körper sind die Verhältnisse des Schwerpunktes andere als bei einem auf einer Unterlage ruhenden Körper. Bei einem homogenen Körper liegt der Schwerpunkt stets höher als derjenige der verdrängten Wassermasse; von den verschiedenen möglichen Lagen des Körpers ist diejenige die stabilste, bei welcher der Schwerpunkt am nächsten über demjenigen der verdrängten Flüssigkeit liegt. So hat ein schwimmendes Holzprisma von größerer Höhe als Durchmesser eine größere Stabilität in liegender als in stehender Lage. Die Rücksichten auf Stabilität sind besonders bei Schiffen bezüglich der Bauart und hauptsächlich der Art der Belastung zu beachten. Bei der größten Neigung, die ein Schiff auf Augenblicke durch Sturm und Wellen einnehmen kann, muß der Auftrieb des Wassers so angreifen, daß er zur Wiederaufrichtung, nicht zur Vermehrung der Neigung beiträgt.



28 u. 29. Metazentrum.

Wird der in Abb. 28 im Schnitt dargestellte Schiffskörper, dessen Schwerpunkt bei a liegen möge, in die Lage Abb. 29 geneigt, so bleibt die Schwere G in a wirkend bestehen. Der Auftrieb P greift im Schwerpunkt des Raumes des verdrängten Wasservolumens, also der schraffierten Fläche, bei b an. Unter diesen Bedingungen richtet sich das Schiff wieder auf, denn der Auftrieb wirkt entgegengesetzt der Neigung. Der Durchschnittspunkt M der Richtung des Auftriebs mit der Vertikalen durch den Schwerpunkt in normaler Lage (also der Vertikalachse des Schiffes), heißt das **Metazentrum** des Schiffes. Wie aus der Abbildung ersichtlich, liegt derselbe stets über dem Schwerpunkt, wenn der Auftrieb vom letzteren aus nach der Seite der Neigung liegt. Es ist also Bedingung, daß das Metazentrum in allen möglicherweise vorkommenden Lagen über dem Schiffsschwerpunkt liegt. Allgemein wird ein Schiff um so stabiler, die Fähigkeit zur Wiederaufrichtung ist um so größer, je tiefer der Schwerpunkt liegt. Bei Dampfern wird schon durch die in den unteren Schiffsräumen liegenden Kohlen, die Kessel und Maschinen der Schwerpunkt tief gelegt; im übrigen wird durch die Art der Beladung und eventuell durch Ballast für die Erfüllung dieser Bedingung gesorgt.

Bestimmung der spezifischen Gewichte. Auf dem hydrostatischen Auftrieb beruhen die Methoden zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes der Körper und ihre Anwendungen. Das zunächstliegende, direkte Verfahren zur Bestimmung der Dichte und der spezifischen Gewichte der Körper besteht, entsprechend den früheren Darlegungen, darin, das Gewicht durch Wägung nach Kilogramm und das Volumen durch Ausmessung nach Kubikdezimeter zu bestimmen und ersteres durch letzteres zu dividieren. Dieses Verfahren bietet aber praktisch meistens große Schwierigkeiten, da die genaue Volumenbestimmung unregelmäßiger Körper durch direkte Ausmessung sehr umständlich oder unmöglich ist. Man wendet deshalb allgemein das Archimedische Prinzip an. Bei der **hydrostatischen Wage** besteht das Verfahren darin, daß man zuerst die Körper mittels eines dünnen Fadens an der einen Schale einer Wage aufhängt und sein Gewicht G in der Luft fest-

stellt; hierauf läßt man den Körper in ein untergesetztes Gefäß mit Wasser ganz eintauchen. Der hydrostatische Auftrieb bewirkt einen Gewichtsverlust G', den man bestimmt, indem man von der anderen Wagschale so viel an Gewicht fortnimmt, bis die Wage wieder einspielt. Durch Division des zuerst bestimmten absoluten Gewichtes durch den Gewichtsverlust $\frac{G}{G'}$ erhält man das spezifische Gewicht, denn der Gewichtsverlust ist gleich dem Gewicht des von dem Körper beim Eintauchen verdrängten, also eines gleichen Volumen Wassers.

Bei genauen wissenschaftlichen Bestimmungen muß bei der Wägung des Körpers in der Luft auch noch der Auftrieb der letzteren berücksichtigt werden.

Ist der Körper leichter als Wasser, so daß er nicht ganz eintaucht, so bestimmt man zuerst sein Gewicht G in der Luft und beschwert ihn hierauf durch einen Körper von hohem spezifischen Gewicht, z. B. Blei, dessen Gewichtsverlust g in Wasser vorher in der obigen Weise festgestellt wird, derart, daß der Körper ganz ins Wasser eintaucht. Alsdann bestimmt man durch Wägung in der Luft und nach Eintauchen in Wasser den Gewichtsverlust G' des Körpers mit der Bleibeschwerung. Das spezifische Gewicht berechnet sich dann als $\frac{G}{G'-g}$; der Divisor G'—g stellt nämlich das Gewicht des von dem Körper verdrängten Wassers dar, indem von der Gesamtverdrängung des beschwerten Körpers G der vorher bestimmte Gewichtsverlust g, also die Wasserverdrängung des Bleies, abgezogen wird.

Bei in Wasser löslichen Körpern verfährt man in der Weise daß man zuerst das spezifische Gewicht S in Bezug auf eine Flüssigkeit bestimmt, in welcher derselbe nicht löslich ist; hierauf bestimmt man das spezifische Gewicht S' dieser Hilfsflüssigkeit in Bezug auf Wasser. Das spezifische Gewicht des Körpers erhält man dann aus dem Produkte $S \times S'$.

Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes einer Flüssigkeit bedient man sich umgekehrt eines festen Hilfskörpers, dessen Gewichtsverluste G und G' in Wasser und in der zu untersuchenden Flüssigkeit man bestimmt. Das spezifische Gewicht der letzteren ist dann $\frac{G'}{G}$. Man kann auch direkt aus der Vergleichung der Gewichte gleicher Volumina Wasser und einer anderen Flüssigkeit das spezifische Gewicht der letzteren bestimmen, indem man mittels des Pyknometers, eines Glasgefäßes mit engem Halse, nacheinander genau gleiche Volumina Wasser und dieser Flüssigkeit wiegt. Nach Abzug des Gewichtes des Glasgefäßes erhält man direkt die Verhältniszahl für das spezifische Gewicht der Flüssigkeit.

30. Aräometer.

Eine weit bequemere Methode zur Bestimmung der spezifischen Gewichte von Flüssigkeiten bietet die Anwendung des Aräometers oder der Senkwage; hierbei werden nicht wie bei der hydrostatischen Wage die Gewichte gleicher Volumina verglichen, sondern umgekehrt die Volumina gleicher Gewichte bestimmt, was natürlich zu demselben Resultat führen muß, indem sich bei gleichen Gewichten zweier Körper ihre spezifischen Gewichte umgekehrt verhalten, wie ihre Volumina. Ein Aräometer (Abb. 30) besteht allgemein aus einer an beiden Enden zugeschmolzenen Glasröhre, in deren unteren Ende zur Beschwerung eine gewisse Menge Quecksilber oder Schrot sich befindet, so daß die Röhre in einer Flüssigkeit in senkrechter Lage stabil schwimmt, dabei zum Teil aus derselben herausragt. Nach dem Archimedischen Prinzip verdrängt das Aräometer so viel Flüssigkeit, daß das Gewicht des verdrängten Volumens gleich dem Gewicht des Aräometers ist. Bei verschieden schweren Flüssigkeiten müssen also die verdrängten Volumina verschieden sein, und zwar müssen sie sich umgekehrt verhalten, wie ihre spezifischen Gewichte; das Aräometer taucht also in einer leichteren Flüssigkeit tiefer ein, als in einer schwereren. Ist die Glasröhre überall genau gleich weit, so verhalten sich die verdrängten Volumina, wie die Längen des eintauchenden Teiles; man kann also die spezifischen Gewichte der Flüssigkeiten direkt nach diesen Längen berechnen. Bezeichnet man den Punkt, bis zu welchem das Aräometer in Wasser eintaucht, mit 100, teilt den eintauchenden Teil in 100 gleiche

Teile und setzt diese Teilung nach oben fort, so ist z. B. bei einer Flüssigkeit mit der Eintauchtiefe 75 das spezifische Gewicht $\frac{100}{75} = 1,_{33}$. Für den praktischen Gebrauch macht man die Aräometer nicht, wie vorher angenommen, überall gleich weit, sondern unten weiter und bringt nur an dem oberen, über dem Flüssigkeitsspiegel herausragenden Teil die Skala an (s. Abb. 30). Die Skala muß dann natürlich anders eingeteilt sein. Die verdrängten Wassermengen verhalten sich nicht mehr direkt wie die ganzen Eintauchtiefen; die Teilung geht nach unten nur so weit, wie der engere, genau gleich weite cylindrische Hals reicht. Die Dimensionen und die Beschwerung dieser Aräometer müssen so eingerichtet sein, daß bei allen Flüssigkeiten, für welche sie angewendet werden sollen, der erweiterte untere Teil ganz eintaucht. Man kann auch die Skala so einrichten, daß direkt die spezifischen Gewichte ablesbar sind. Ferner kann man für bestimmte Flüssigkeiten oder Lösungen, z. B. Alkohol, Schwefelsäure, die Skala so einteilen, daß direkt der Prozentgehalt abgelesen werden kann. Eine bekannte praktische Anwendung des Aräometers ist z. B. die Milchwage. Vollmilch mit ihrem vollen Fettgehalt hat ein geringeres spezifisches Gewicht, als fettarme, abgerahmte oder mit Wasser verdünnte Milch; durch ein entsprechend eingeteiltes Aräometer kann man hiernach direkt die Güte einer Milch beurteilen.

Außer den besprochenen Skalenaräometern gibt es noch Gewichtsaräometer zur Bestimmung der spezifischen Gewichte fester Körper. Das Gewichtsaräometer beruht ebenfalls auf dem hydrostatischen Auftrieb. Es besteht aus einem länglichen cylindrischen, meist an beiden Enden kegelförmig zulaufenden Hohlkörper aus Glas oder Messingblech, welcher stabil vertikal im Wasser schwimmt; am unteren Ende trägt der Schwimmkörper einen kleinen Teller, am oberen Ende eine leichte Stange mit einer Schale zum Auflegen von Gewichten. An der Stange befindet sich eine Marke; man legt zuerst ein Stück des zu untersuchenden Körpers auf die obere Schale und so viel Gewicht hinzu, daß der Hohlcylinder ganz ins Wasser eintaucht und die Marke an der Stange genau mit dem Wasserspiegel einspielt. Hierauf legt man den Körper auf den unteren Teller, so daß er im Wasser eintaucht; hierbei verliert er durch den Auftrieb an Gewicht, und wenn man jetzt auf die obere Schale so viel Gewicht zulegt, bis die Marke wieder mit der Wasseroberfläche gleich steht, so ist dieses Gewicht gleich dem Auftrieb des Körpers, woraus sich in Verbindung mit dem noch zu bestimmenden absoluten Gewicht direkt das spezifische Gewicht ergibt.

Auch die spezifischen Gewichte von Flüssigkeiten lassen sich mit dem Gewichtsaräometer bestimmen. Man stellt zuerst das absolute Gewicht Q des Instrumentes fest und bringt es nacheinander in Wasser und in die zu untersuchende Flüssigkeit; in beiden bringt man es durch Auflegen von Gewichten zu gleich tiefem Eintauchen, also bis zu der Marke an der Stange. Sind die hierzu erforderlichen Gewichte q (bei Wasser) und q' (bei der anderen Flüssigkeit), so ist das spezifische Gewicht der letzteren $= \frac{Q + q'}{Q + q}$.

Die spezifischen Gewichte von gasförmigen Körpern werden bestimmt durch direkte Wägung und Vergleichung der Gewichte gleicher Volumina des Gases und Wasser oder Luft, je nachdem sich das spezifische Gewicht auf Wasser oder auf Luft beziehen soll. Man wiegt einen mit dichtschließendem Hahn versehenen Glasballon leer, also nachdem er mittels einer guten Luftpumpe möglichst vollkommen luftleer gepumpt worden ist, dann mit Luft gefüllt und hierauf mit dem betreffenden Gase gefüllt; nach Abzug des Gewichtes des leeren Ballons selbst von den beiden letzten Gewichten erhält man die Gewichte gleicher Volumina Luft und des zu bestimmenden Gases, woraus sich direkt das spezifische Gewicht des letzteren in Bezug auf Luft ergibt. Soll sich das spezifische Gewicht auf Wasser beziehen, so tritt an Stelle der Wägung des Ballons mit Luft diejenige des mit Wasser gefüllten Ballons; da aber das spezifische Gewicht der Luft bekannt ist, so lassen sich die spezifischen Gewichte der Gase bezogen auf Luft und auf Wasser auseinander berechnen.

Da die Gase ebenso wie die Flüssigkeiten auf in ihnen befindliche Körper einen Auftrieb ausüben, so kann man auch bei Gasen wie bei Flüssigkeiten direkt die auf dem Archimedischen Prinzip beruhende Methode zur Bestimmung der spezifischen Gewichte bei

Gasen anwenden. Man hängt an einen Arm einer sehr empfindlichen Wage einen zugeschmolzenen Glasballon und setzt die Wage unter den Rezipienten einer guten Luftpumpe, in welchem eine möglichst weitgehende Luftleere erzeugt wird, und bringt die Wage so im evakuierten Raume genau zum Einspielen. Füllt man nun den Rezipienten mit dem zu bestimmenden Gase, so erleidet der Ballon einen Auftrieb, also Gewichtsverlust; durch Vergleichung mit dem Gewichtsverlust desselben Ballons in Luft oder Wasser erhält man das spezifische Gewicht des Gases bezogen auf Luft oder auf Wasser.

Das Pendel und seine Anwendung.

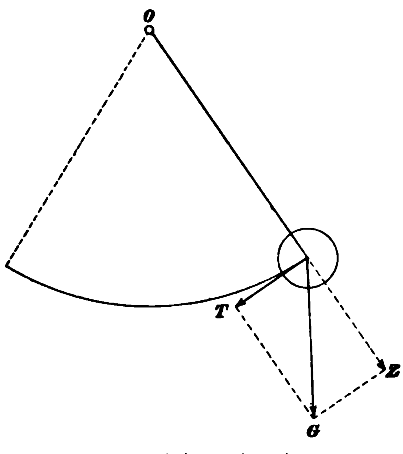
Entdeckung der Pendelgesetze durch Galilei. Mathematisches und physisches Pendel. Foucaults Pendelversuch. Galileis und Huyghens Pendeluhren. Kompensationspendel. Reversionspendel. Bestimmung der Intensität der Schwerkraft und der Erddichte durch das Pendel.

Die Entdeckung der Pendelgesetze verdanken wir, wie so manche der wichtigsten Errungenschaften auf dem Gebiete der Naturwissenschaften, dem großen Galilei, über dessen Leben schon in einem früheren Kapitel einiges mitgeteilt ist. Wie bei vielen bedeutsamen Entdeckungen, z. B. dem Archimedischen Prinzip und der Schwerkraft, hat sich auch an diese Entdeckung Galileis eine Sage angeknüpft, die, wenn sie wahr ist, dadurch, daß sie die Entdeckung einem Zufall zuschreibt, doch nichts von dem Verdienste Galileis fortnimmt. Denn darin besteht eben die Überlegenheit und der Erfolg der großen Forscher, daß sie Erscheinungen in der Natur, an denen die große Menge Tag für Tag, Jahrhunderte hindurch, ohne Beachtung und Nachdenken vorbeigeht, in den Kreis ihrer Betrachtungen ziehen, indem sie erkennen, daß diese Erscheinungen die Äußerungen von Ursachen sind, denen es verlohnt, nachzuforschen. Der 20jährige Galilei soll während eines Gottesdienstes im Dome zu Pisa auf die hin und herschwingende Bewegung einer von dem hohen Gewölbe an einem Seile herniederhängenden Bronzelampe aufmerksam geworden sein, die durch irgend welchen Zufall in Bewegung gesetzt worden war. Dieselbe schwang ruhig und regelmäßig vor dem Altare an dem Seile durch den weihrauchgefüllten, orgeldurchbrausten Raum, und Galilei bemerkte zu seinem Erstaunen durch Beobachtung mittels seines Pulsschlages, daß die Schwingungszeit dieselbe blieb, obgleich die Schwingungen langsam immer kleiner wurden. Diese Beobachtungen regten zur Nachforschung an; er ahnte sofort, daß sich aus seiner Entdeckung wichtige Folgerungen ziehen ließen. Sein erster Gedanke war, infolge seiner damaligen medizinischen Studien, eine Anwendung zur Messung des Pulsschlages; man fühlte schon lange den Kranken den Puls, aber man wußte nicht, die Pulsschläge zu messen oder für eine genaue kurze Zeit die Anzahl derselben festzustellen. Galilei fand hierzu im Pendel ein bequemes Mittel und richtete dasselbe so ein, daß auf einfache Weise die Länge beliebig verlängert oder verkürzt werden konnte. Man brachte auf diese Art die Pendelschwingungen mit den Pulsschlägen in Übereinstimmung und sagte z. B.: Der Fieberkranke zeigt 6 Zoll 3 Linien am Pulsmaß (d. h. also, sein Puls schlägt so schnell, wie ein 6 Zoll 3 Linien langes Pendel schwingt), wie man heute sagt: Der Puls hat 140 Schläge pro Minute. Weiterhin aber stellte Galilei durch Versuche das Hauptpendelgesetz auf, während die mathematische Entwickelung und Begründung der Pendelgesetze erst später durch Huyghens erfolgte.

Der Begriff des Pendels ist wohl jedem von den Wanduhren her vertraut. Es besteht aus einem Körper, der durch eine leichte Stange oder Schnur so an einem Punkt möglichst leicht beweglich aufgehängt ist, daß er um diesen schwingen kann. Bei dem **mathematischen Pendel** denkt man sich die Masse des Körpers in einem Punkte vereinigt und ferner die Aufhängung durch eine vollständig gewichtslose Linie bewirkt. Diese Annahmen werden für die mathematische Behandlung der Aufgaben gemacht, um den Luftwiderstand bei der Bewegung des Körpers und ferner das Gewicht des Fadens ganz vernachlässigen zu können. In Wirklichkeit lassen sich Pendel, die diesen Bedingungen entsprechen, nicht herstellen. Das Gewicht nimmt stets einen gewissen Raum ein und findet ebenso wie die Aufhängungsschnur, auch wenn sie aus einem feinen Kokonfaden

besteht, stets einen gewissen Luftwiderstand, der die mathematisch berechnete, gesetzmäßige Pendelbewegung beeinflußt. Alle wirklichen Pendel heißen, entgegen den nur gedachten mathematischen, physische Pendel.

Die Gesetze der Pendelbewegung sind eine besondere Anwendung der Gesetze des freien Falls. Ein in Gang gesetztes Pendel fällt von einer Endlage, also dem höchsten Punkte seiner Bewegung, in die tiefste, mittlere Lage (Ruhelage) mit beschleunigter Geschwindigkeit, und zwar ist die Bewegung durch die Aufhängung eine zwangsläufige in einem Kreisbogen; durch die Trägheit setzt das Pendel seine Bewegung über den tiefsten Punkt hinaus fort, und durch die Schwerkraft wird die Geschwindigkeit hierbei stetig verringert, bis in derselben Höhe, von der aus an der anderen Seite die Bewegung anfing, die Rückwärtsbewegung beginnt u. s. w. Da keine Energie abgegeben wird, außer zur Überwindung des Luftwiderstandes und der Reibung am Aufhängungspunkte, so bewegt sich ein Pendel eine geraume Zeit, ehe es zum Stillstand kommt; die größte Geschwindigkeit findet beim Passieren der mittleren Lage statt. Wie aus der Abb. 31 ersichtlich, läßt sich die Bewegung des Pendels mittels Kräftezerlegung nach dem Parallelogramm aus der Schwerkraft ableiten. An dem um den Aufhängungspunkt O schwingenden Pendel wirkt die Schwerkraft G senkrecht nach unten, dieselbe zerlegt sich in die Zugkraft Z, welche in der Richtung der Pendelschnur oder Stange an dieser zieht, und die tangential zum Schwingungsbogen gerichtete Kraft T. Die Richtung der letzteren ändert sich während der Bewegung in jedem Augenblick, da sie in jedem Zeitmomente die Tangente an dem Bogen in einem anderen Punkte bildet. Da G, die Beschleunigung der Schwerkraft, wie wir früher gesehen haben, unabhängig vom Gewichte für alle Körper = 9,81 m pro Sekunde ist, so ist auch die Komponente T und damit die Pendelbewegung vom Gewichte des Pendels unabhängig.



31. Pendel, Kräftezerlegung.

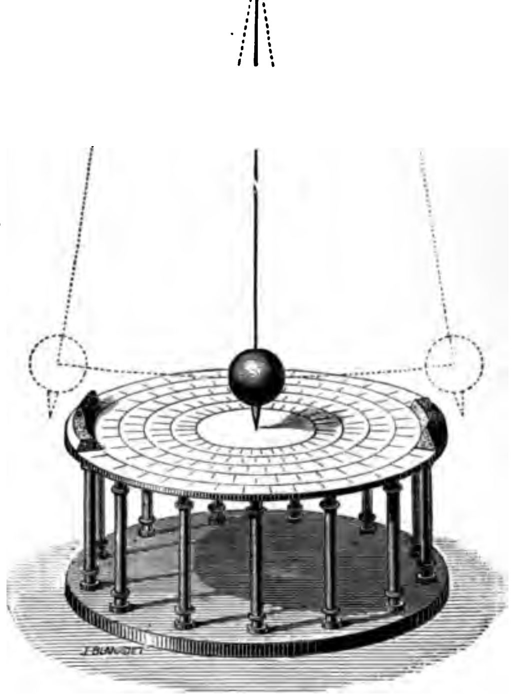
Die Entfernung des schweren pendelnden Punktes vom Aufhängungspunkte heißt die Pendellänge, die größte Winkelabweichung von der mittleren Ruhelage die Schwingungsweite oder Amplitüde, die Bewegung von einer Amplitüdenstellung bis zur anderen eine Pendelschwingung und die hierzu gebrauchte Zeit die Schwingungsdauer.

Das Pendelgesetz lautet: Die Quadrate der Schwingungszeiten zweier Pendel verhalten sich wie die Pendellängen; oder anders ausgedrückt: Die Schwingungsdauern verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Längen. Hiernach ist das Gewicht eines Pendels auf die Schwingungsdauer ohne Einfluß, ebenso der Ausschlag, denn beide sind in der vorstehenden Beziehung nicht enthalten. Wenn ein Pendel von 1 m Länge in einer bestimmten Zeit zwei Schwingungen macht, so macht ein anderes von 4 m Länge in derselben Zeit eine Schwingung, gleichgültig, ob dieses schwerer oder leichter ist, größere oder kleinere Ausschläge macht.

Das Pendel schwingt stets in einer und derselben Vertikalebene. Diese selbstverständliche Eigenschaft des Pendels wird zu einem einfachen und interessanten Versuche angewendet, nämlich, um die Achsendrehung der Erde sichtbar zu demonstrieren.

Wenn auch schon seit langer Zeit kein Zweifel herrschen konnte, daß die Erde sich um ihre Achse drehe, so war es doch bis Mitte unseres Jahrhunderts nicht gelungen, diese Umdrehung auf experimentellem Wege nachzuweisen. Die Schwierigkeit besteht darin, daß alle Gegenstände auf der Erde gleichmäßig an dieser Drehung teilnehmen; wir haben keinen festen Punkt, von dem aus wir die Bewegung messen können. Auf die Bewegung eines Pendels hat aber die Rotation keinen Einfluß, dieselbe behält ihre Schwingungsebene im Raume bei. Wenn die Erde unter dieser unbeweglichen Ebene ihre Drehung ausführt, so muß die Erscheinung auftreten, als ob die Pendelebene eine Drehung in entgegen-

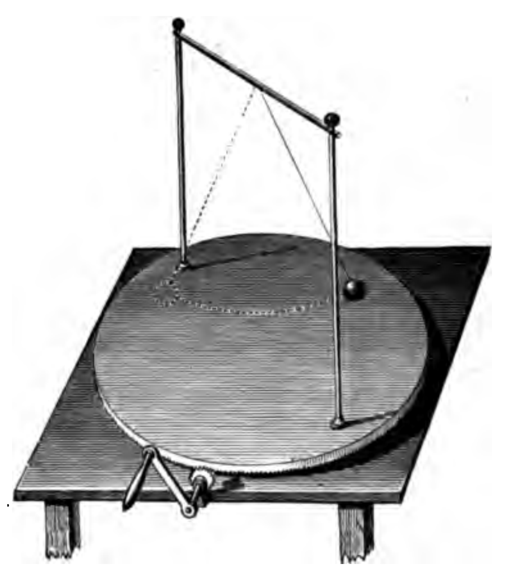
gesetztem Sinne vollführe. Der Physiker **Foucault** von der Pariser Sternwarte hat zuerst diesen Versuch 1852 ausgeführt. Nach einigen Vorversuchen fand der Hauptversuch im Pantheon statt; in der Kuppel desselben wurde an einem 67 m langen Stahldraht eine 28 kg schwere Kupferkugel aufgehängt; die Schwingungsdauer betrug 16,4 Sekunden. Genau unter dem Aufhängungspunkte war der Mittelpunkt eines eingeteilten Kreises (Abb. 32). Am Umfange desselben waren diametral gegenüber zwei schräg zugespitzte Streifen feuchten Sandes aufgehäuft; bei jeder Schwingung strich nun die Spitze des Pendels etwas von der Kante dieser Sandhaufen ab und zwar bei einer Entfernung der beiden Sandhaufen von 6 m bei jeder Schwingung 2,3 mm. Um genau soviel hatte sich die Erde und damit die Kreisscheibe in der Schwingungszeit gedreht. Das Pendel blieb mit allmählich kleiner werdendem Ausschlage 5—6 Stunden in Bewegung und die Drehung der Kreisscheibe betrug in dieser Zeit 60—70°.



32. Foucaults Pendelversuch.

Nach dem Bekanntwerden des ersten öffentlichen Foucaultschen Versuches, der seiner Zeit viel Aufsehen erregte, wurde derselbe vielfach wiederholt. Da für das Gelingen möglichst hohe Aufhängung eines schweren Pendels erforderlich ist, damit die Pendelschwingungen eine große Energie besitzen und von kleineren, äußeren Störungen, wie Luftzug, Reibung an der Aufhängestelle möglichst wenig beeinflußt werden, wurden besonders in hohen Kirchen Versuche angestellt; zur direkten Beobachtung der Erddrehung ist eine Pendellänge von mindestens 10—12 m erforderlich. Besonders in den Domen zu Köln und Speier sind wegen der Genauigkeit ihrer Resultate bemerkenswerte Ergebnisse erzielt worden.

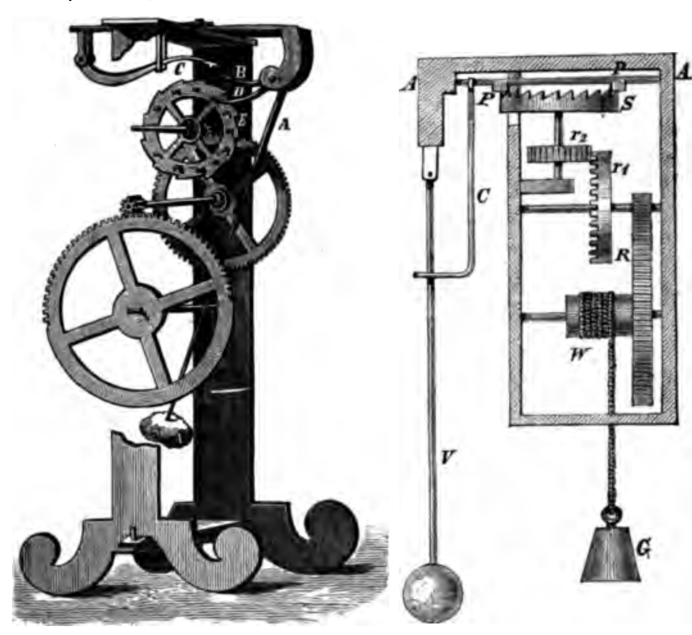
Der Foucaultsche Versuch läßt sich durch eine einfache Vorrichtung, wie Abb. 33 darstellt, nachahmen. Ein Pendel hängt an einer recht feinen Schnur an einem Stativ, welches auf einer drehbaren Scheibe sitzt. Wird das Pendel in Bewegung und die Scheibe in langsame Rotation versetzt, so verschiebt sich die Achse der Scheibe zur Schwingungsebene des Pendels. Mit dieser primitiven Vorrichtung ist es allerdings nicht möglich, die natürliche Drehung der Erde selbst zu zeigen, vielmehr muß, wie erwähnt, die Scheibe gedreht werden, etwa durch eine Kurbel, wie in der Abbildung.



33. Einfache Vorrichtung für Foucaults Pendelversuch.

Über dem Nordpol oder dem Südpol würde das Pendel genau in 24 Stunden eine ganze Achsenumdrehung der Erde zeigen. Am Äquator verschwindet die Erscheinung, da hier jede Vertikalebene, auch wenn sie von der Bewegung der Erde abhängig ist, ihre relative Lage zu derselben nicht ändert. Für alle übrigen Punkte der Erde läßt sich aus ihrem Breitengrade leicht berechnen, in welcher Zeit bei dem obigen Versuch das Pendel den ganzen Kreis des Horizonts durchläuft. Diese beträgt z. B. für Königsberg 28 Stunden 3 Minuten, für München 31 Stunden 45 Minuten, für Cayenne (nahe am Äquator) 11 Tage $11^1/_2$ Stunden.

Die oben dargelegten Pendelgesetze gelten nur für mathematische Pendel. Es ist das Verdienst des holländischen Mathematikers **Christian Huyghens van Zuylichem**, geb. 1629, gest. 1695, der bereits früher als einer der drei bedeutenden Nachfolger Galileis genannt wurde, auch die wirklichen Pendel so eingerichtet zu haben, daß die mathematischen Gesetze für sie gelten, so daß sie für wissenschaftlich genaue Arbeiten gebraucht werden können. Er wies nach, daß man für ein physisches Pendel nur den Punkt zu suchen brauche, dessen Abstand vom Aufhängepunkte die Länge des mathematischen Pendels von gleicher Schwingungsdauer gibt, und diese dann als die Länge des Pendels zu Grunde legen könne (s. weiter unten).



34. Galileis Pendeluhr. 35. Huyghens Pendeluhr.

Da nach den Pendelgesetzen die Schwingungsdauer nur von der Länge des Pendels abhängt, jede Schwingung bei einem Pendel von bestimmter Länge also eine ganz genau bestimmte Zeit dauert, so eignet sich das Pendel vorzüglich zur **Zeitmessung**. Das Verdienst, dies zuerst klar erkannt zu haben, gebührt **Galilei**. Er hat auch die erste Pendeluhr erfunden. Seine erste Konstruktion war noch ziemlich unvollkommen und praktisch kaum verwendbar, denn das Pendel mußte von Zeit zu Zeit angestoßen werden, konnte also als eine Uhr eigentlich nicht gelten. Er trat über diese Erfindung in Unterhandlung mit den Generalstaaten der Niederlande, welche aber zu keinem Ergebnisse führten; die holländische Regierung sandte ihm zwar als Gnadenbeweis, und um die Verhandlungen in Fluß zu bringen, eine goldene Kette; aber Galilei, welcher noch unter dem Eindruck der Verfolgung seitens der Inquisition stand und als Gefangener in seinem Landhause zu Arcetri bei Florenz weilte, wagte es nicht, dieses Zeichen der Anerkennung von einer protestantischen Macht anzunehmen. Inzwischen war er auch erblindet, aber er gab seine Idee keineswegs auf. Nach seinen Angaben konstruierten sein Sohn Vincencio und sein Schüler **Viviani** einen neuen Apparat, der die **erste Pendeluhr** darstellt; Abb. 34 ist eine Darstellung derselben. An der Welle des untersten Zahnrades hängt an einer umgewickelten und befestigten Schnur ein Gewicht (in der Zeichnung fortgelassen), welches dieses Rad und mittels weiterer Zahnradübertragung das auf der obersten Achse sitzende, mit einseitigen scharfen Zähnen versehene Sperrrad zu drehen bestrebt ist. An der Achse des Pendels sind an derselben Seite übereinander zwei Haken

angebracht; beim Ausschlag nach der einen Seite, in der Lage, wie die Abbildung angibt, hebt der obere einen federnden Sperrhaken aus den Zähnen eines Sperrrades aus, der untere greift unter einen der an diesem Rade seitlich sitzenden Stifte und arretiert das Rad auf diese Weise. Schwingt nun das Pendel nach der anderen Seite, so gleitet in der mittleren Lage der untere Dorn von dem Stift ab und erhält hierbei von dem mit einem kleinen Ruck sich in Drehung setzenden Rade einen Anstoß, der dem Pendel wieder frischen Antrieb gibt. Das Sperrrad kann aber nur um einen Zahn vorrücken, da jetzt gleich die Sperrfeder, die von dem mit dem Pendel zurückgehenden oberen Pendelhaken nicht mehr zurückgehalten wird, in einen Zahn eingreift. Beim Zurückschwingen hebt der obere Pendelhaken diese Arretierung wieder auf, aber wieder nur um einen Zahn, da sich der untere Sperrhaken des Pendels, wie in der ersten Stellung, wieder vor einen Stift desselben legt. Das Sperrrad rückt also bei jeder Pendelschwingung, also in genau gleichen Zeiten, um einen Zahn vor, und durch ein passendes Räderwerk kann diese Bewegung in beliebiger Weise auf ein Zeigerwerk übertragen werden. Die Uhr geht so lange, als das Gewicht an der unteren Achse über dem Boden schwebt, dann muß dasselbe neu aufgezogen werden. Wir haben hier also die erste richtige Pendeluhr, und ein in neuerer Zeit nach der alten aufgefundenen Zeichnung ausgeführtes Modell hat in der That die Gangbarkeit desselben bewiesen. Die Ausführung wurde durch den inzwischen eingetretenen Tod Galileis allerdings vereitelt. Sein Sohn begann später die Ausführung der Erfindung seines Vaters; als er das erste Exemplar fertiggestellt und sich mit Viviani von der Brauchbarkeit überzeugt hatte, wurde auch der junge Galilei plötzlich von einem Fieber fortgerafft. Viviani hatte sich früher zur Geheimhaltung der Erfindung verpflichtet, und er hielt sich an sein Versprechen so streng gebunden, daß er nichts davon veröffentlichte, selbst nicht in der von ihm verfaßten Lebensbeschreibung seines Meisters.



36. Christian Huyghens.

So blieb die Erfindung zunächst ganz unbekannt, und Huyghens erfand selbständig, ohne von derselben Kenntnis zu haben, eine neue Pendeluhr, die ihm 1656 von den Generalstaaten patentiert wurde. Seine erste Konstruktion hatte statt des gewöhnlichen ein

Horizontalpendel; dieselbe ergab aber keinen gleichmäßigen Gang. Bei einer neuen Konstruktion ging Huyghens wieder zum Vertikalpendel über. Abb. 35 zeigt diese neue Pendeluhr. Durch das mittels einer Schnur an der Welle W ziehende Gewicht G wird durch die zwei Zahnräderorgane R und r_1 r_2 das Sperrrad S bewegt. Das Pendel V hängt an einem federnden Stahlblech (zur Beseitigung der mit anderen Aufhängungen verbundenen Reibung). Durch die gabelförmig um die Pendelstange greifende Stange C wird bei jeder Schwingung die Stange A A vor- oder zurückgeschoben, wobei die an dieser Stange befestigten diametral am Umfange des Sperrrades S sitzenden Platten P P sich abwechselnd vor einen Sperrzahn legen und so die Arretierung bewirken.

Eine andere Konstruktion zeigt noch Abb. 37. Das Pendel T ist in ähnlicher Weise bei a aufgehängt. Bei jeder Schwingung wird mittels der Gabel A B eine an der Achse o hängende Stange mitgenommen; auf dieser Achse sitzt eine Sperrklinke, die mit ihren beiden Haken m n abwechselnd in das Sperrrad eingreift. Die Wirkungsweise ist im übrigen dieselbe wie bei der vorigen Konstruktion. Durch Verschiebung des Pendelgewichtes kann die Schwingungsdauer vergrößert oder verkleinert, und so der Gang der Uhr genau reguliert werden, wie dies noch heute bei den Wanduhren geschieht.

Diese Uhren mit vertikalem Pendel konnten aber nicht auf See verwendet werden, da bei den Schwankungen des Schiffes das Pendel nicht richtig funktionieren kann. Die ursprünglichen Verhandlungen der Generalstaaten mit Galilei bezweckten aber gerade die Beschaffung einer auf See brauchbaren Uhr. Huyghens erfand später auch diese, indem er an den damals in Gebrauch gekommenen ungenauen Tafeluhren mit horizontalem Pendel die Unruhe zufügte, welche seitdem für Taschenuhren allgemein angewendet, und durch welche der Gang genau gemacht wird.

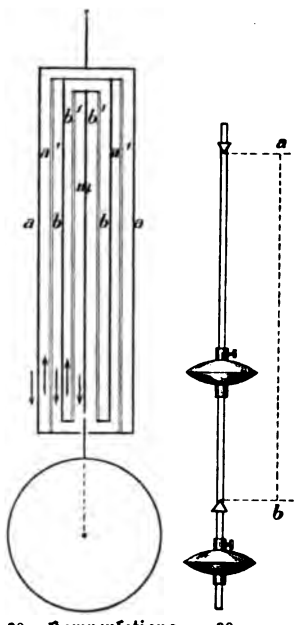
37. Uhrpendel.

Nach Veröffentlichung der Erfindungen Huyghens wurden Prioritätsansprüche zu gunsten Galileis erhoben, und nachdem Huyghens die bis dahin geheim gehaltene Erfindung dieses von ihm hochverehrten Mannes kennen gelernt hatte, erkannte er bereitwilligst dessen Priorität an. Sein Ruhm ist hierdurch nicht geschmälert, denn die Welt verdankt doch ihm schließlich die Erfindung.

Kompensationspendel. Wie wir oben gesehen haben und aus dem täglichen Leben wissen, kann man den Gang einer Uhr durch Verschiebung des Pendelgewichtes beschleunigen oder verlangsamen, da die Schwingungsdauer des Pendels nur von seiner Länge abhängig ist. Solche Änderungen an der Länge des Pendels werden aber schon unabsichtlich durch die Temperaturunterschiede bewirkt; alle Metalle dehnen sich durch Wärme aus und ziehen sich bei Abkühlung zusammen. Dies tritt besonders bei Metallstäben zu Tage, da hierbei die Längendimension die anderen weit übersteigt. Man erkannte diesen Übelstand schon sehr bald und suchte nach Mitteln, ihn abzustellen, also die Längenänderung des Metallstabes zu kompensieren. Ein ganz guter Ausweg, der bis in unsere Zeit noch benutzt worden ist, bestand darin, anstatt der festen Metalllinse ein senkrecht gestelltes, längliches Gefäß mit Quecksilber als Pendelgewicht zu verwenden; wird durch Wärmezunahme die Pendelstange verlängert, so dehnt sich gleichzeitig auch das Quecksilber aus und steigt in die Höhe, so daß bei richtiger Dimensionierung der Pendelschwerpunkt und damit die wirksame Pendellänge unverändert bleibt. Eine andere Art Kompensationspendel ist indessen allgemeiner eingeführt worden; ein solches stellt Abb. 38 dar. An Stelle des einen Stabes sind mehrere aus verschiedenen Metallen getreten, deren Ausdehnungen sich gegenseitig aufheben, indem dieselben teils nach unten, teils nach oben stattfinden. Auf dem unteren Querstabe des aus Eisen bestehenden äußeren Rahmens a a sitzen die Messingstäbe a′ a′; an dem oberen Verbindungsstücke desselben hängen die Eisenstäbe b b,

welche unten wieder an Querstückchen die Messingstäbe b' b' tragen, und an letzteren hängt oben schließlich der mittlere Tragstab m der Linse. Der Vorgang bei einer Erwärmung ist also folgender: a a dehnen sich nach unten aus, a' a' nach oben, b b wieder nach unten und b' b' nach oben; der mittlere Stab m endlich verlängert sich wieder nach unten. Durch die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Metalle kann man es auf diese Weise erreichen, daß die ganze Länge bis zum Mittelpunkt des Pendelgewichtes unverändert bleibt.

Das Reversionspendel. Um mit einem physikalischen Pendel Messungen auf Grund der mathematischen Pendelgesetze ausführen zu können, ist das nächstliegende Mittel, dasselbe möglichst dem mathematischen Pendel zu nähern, indem man die Aufhängung möglichst leicht macht, eine kleine aber schwere, vollständig homogene Kugel verwendet und deren Mittelpunkt vom Aufhängungspunkte als wahre Länge des Pendels annimmt. Für wissenschaftliche Arbeiten genügt dies aber nicht; für solche Zwecke dient nun das Reversionspendel, bei dem sich genau die wirkliche, mathematische Länge bestimmen läßt. Dasselbe beruht auf folgendem Prinzip. In jedem wirklichen Pendel gibt es einen Punkt, welcher so schwingt, wie er isoliert als mathematisches Pendel schwingen würde, oder dessen Abstand vom Aufhängungspunkte der Länge eines mathematischen Pendels von derselben Schwingungszeit entspricht. Dieser Punkt heißt Schwingungspunkt. Der Aufhängungspunkt und der Schwingungspunkt lassen sich ohne Änderung der Schwingungszeit vertauschen. Abb. 39 zeigt schematisch ein Reversionspendel. An einem Stabe befinden sich zwei Schneiden a und b zum Aufhängen, sowie zwei Gewichte; es ist entweder eine Schneide verstellbar oder ein oder auch beide Gewichte. Man verschiebt nun beispielsweise ein Gewicht durch Versuchen so lange, bis man für die Aufhängung in a und die umgekehrte in b dieselbe Schwingungszeit erhält; dann ist a b die reduzierte Pendellänge, d. h. das physische Pendel schwingt wie ein mathematisches von dieser Länge und kann wie ein solches behandelt werden. Die Ausführung eines Reversionspendels für wissenschaftliche Arbeiten erfordert außerordentliche Sorgfalt und Genauigkeit. Die Verstellung muß durch feinste Mikrometerschrauben geschehen; die Beobachtung der Schwingungszeiten geschieht mit besonderen Einrichtungen und nach besonders genauen Methoden.



88. Kompensationspendel. 89. Reversionspendel.

Das Sekundenpendel. Weitere Anwendungen des Pendels. In Hinsicht auf unsere allgemein gebräuchliche Zeiteinheit ist es für physikalische und auch für manche technische Versuche von Wert, ein Pendel zu haben, dessen Schwingungsdauer für eine Schwingung (also nicht Hin- und Hergang) genau eine Sekunde beträgt. Die Länge eines solchen beträgt beispielsweise für Berlin 994,224 mm, für Paris 993,856 mm. Durch die soeben genannten verschiedenen Längen des Sekundenpendels kommen wir zu einer besonderen Erscheinung, nämlich daß die Schwingungsdauer von Pendeln gleicher Länge oder eines und desselben Pendels auf Punkten der Erdoberfläche von verschiedener Höhenlage und auch von verschiedenen geographischen Breitengraden verschieden ist. Das erstere ist leicht einzusehen, denn die Pendelgesetze sind ja nur eine Anwendung der Fallgesetze, hängen also von der Schwerkraft ab und diese wieder von der Entfernung der Körper vom Mittelpunkte der Erde, also der Höhe des Punktes über dem Meeresspiegel. Ein Sekundenpendel, dessen Gang für das Meeresniveau berechnet ist, geht auf dem Brocken (1140 m über Meer) täglich 11—12 Sekunden nach, für hohe Gebirge ist die Differenz entsprechend größer. Mittels des Pendels können die genauen Größen der Beschleunigung der Schwerkraft an verschiedenen

Punkten der Erde bestimmt werden. Es besteht allgemein die Beziehung: an verschiedenen Punkten der Erde verhält sich die Intensität der Schwerkraft wie die Länge des Sekundenpendels; oder auf die Schwingungszeiten bezogen: die Intensität der Schwerkraft verhält sich umgekehrt wie das Quadrat der Schwingungszeiten.

Auf einer von der französischen Regierung veranstalteten Expedition nach Cayenne im Jahre 1672 machte der Astronom Richer die Beobachtung, daß eine von Paris mitgenommene genaue astronomische Pendeluhr in Cayenne täglich 148 Sekunden zurückblieb; er mußte, um dies zu korrigieren, das Pendel um 2,8 mm verkürzen. Als die Uhr später nach Paris zurückgebracht wurde, ergab sich genau der entgegengesetzte Fehler; das Pendel mußte wieder um 2,8 mm verlängert werden, damit die Uhr richtig ging. Newton erkannte sofort den Grund dieser rätselhaften Erscheinung, nämlich die Abplattung der Erde in ihren Polen, und umgekehrt in dieser Erscheinung einen Beweis für diese Theorie. In Cayenne ist die Erdoberfläche infolge dieser abgeplatteten Gestalt der Erde weiter vom Mittelpunkte derselben entfernt.

Seit dieser Zeit sind von verschiedenen Forschern noch zahlreiche, sehr genaue Beobachtungen gemacht worden. Bei der berühmten Expedition der Pariser Akademie zur Gradmessung nach Peru 1735—1744 wurden eine Anzahl genauer Werte für die Schwingungszahlen desselben Pendels und die Intensität der Schwerkraft für Orte sehr verschiedener geographischer Breite durch experimentelle Versuche festgestellt, welche mit den rechnungsmäßigen gut übereinstimmten. Neuere genaue Gradmessungen haben die schon von Newton aufgestellte Behauptung, daß die Erde keine Kugel, sondern ein Rotationsellipsoid sei, bestätigt; allerdings ist die Abplattung gegenüber dem Durchmesser nur gering: der Durchmesser von Pol zu Pol beträgt nämlich 1713, der Äquatordurchmesser 1719 Meilen. Zwischen diesen beiden Grenzmaßen variieren alle Punkte, welche auf demselben Meridian liegen, wozu außerdem noch die Unterschiede durch die verschiedenen Höhenlagen über dem Meeresspiegel kommen. Die auf der vorerwähnten Expedition nach Peru bestimmten Werte für die früher besprochene Beschleunigung betragen für

Beobachtungsort	Geographische Breite	m pr. Sek.
Torneo	66° 0 Minuten	9,823
Paris	48° 50 „	9,809
Guayaquil	2° 11 „	9,781.

Für Berlin unter 52° 50 Minuten nördlicher Breite und 40 m Höhe über Meer gilt die Zahl 9,813.

Durch das Pendel ist noch der wichtige Grundsatz der Physik und Mechanik, daß die Beschleunigung der Schwerkraft für alle Körper gleich ist, genau bewiesen worden, nachdem bereits Galilei auf Grund anderer Versuche diesen Satz aufgestellt, aber nicht einwandfrei und exakt bewiesen hatte. Zuerst zeigte Newton, daß ein Pendel, dessen Linse durch eine hohle Metallbüchse ersetzt war, dieselbe Schwingungszeit beibehielt, gleichviel ob die Büchse leer oder mit schweren Substanzen angefüllt war. In exakterer Weise wurde der Nachweis von Bessel wiederholt, welcher Pendel mit gleichgroßen Kugeln an Fäden gleicher Länge und Beschaffenheit im luftleeren Raume schwingen ließ.

Mittels des Pendels ist weiterhin die gegenseitige Anziehung der Massen auf der Erde und damit die mittlere Dichte oder das spezifische Gewicht des Erdballes zu 5,64 bestimmt worden. Direkt zeigt das Pendel die Dichtezunahme der Erde nach dem Innern an; ein Pendel schwingt in einem tiefen Schachte schneller als auf der Erdoberfläche, die Intensität der Schwerkraft nimmt also bis zu einer gewissen Tiefe, und zwar nach Berechnungen bis zu $^1/_6$ des Radius, zu. Bei homogener Beschaffenheit des ganzen Erdkörpers müßte aber die Schwere nach dem Innern stetig abnehmen, da nicht mehr die ganze Masse der Erde nach dem Mittelpunkt anzieht, sondern die von einem Punkte im Erdinnern nach außen gelegene Erdmasse ihre Anziehungskraft in entgegengesetzter Richtung nach der Oberfläche hin äußert. Im Mittelpunkt der Erde ist die Schwerkraft = 0.

Der Stoß. Rammen.

Wenn ein in Bewegung befindlicher Körper mit einem anderen, ruhenden oder auch bewegten Körper zusammentrifft, so entsteht ein **Stoß**. Bewegen sich die Schwerpunkte der beiden Körper vor dem Zusammentreffen in einer und derselben Geraden, welche senkrecht zur Berührungsfläche steht, bezw. geht die Bewegungsrichtung eines bewegten Körpers durch den Schwerpunkt eines ruhenden Körpers und steht dieselbe senkrecht zur Berührungsfläche, so ist der Stoß zentral und gerade, im Gegensatz zum exzentrischen und schiefen Stoß. Beim geraden zentralen Stoß finden nur Geschwindigkeitsänderungen, unter Umständen die Umkehrung der Bewegungsrichtung einer der beiden Körper statt; die Bewegungsrichtung beider Körper bleibt in derselben Geraden, wenn nicht die Bewegung eines oder beider Körper ganz aufhört. Beim schiefen Stoße treten außer Geschwindigkeits- auch Richtungsveränderungen und beim exzentrischen Stoße Drehbewegungen auf. Hier soll nur der gerade zentrale Stoß besprochen werden.

Bei jedem Stoße wird ein Teil der lebendigen Kraft der bewegten Körper zur Deformationsarbeit aufgewendet, sowohl bei elastischen wie bei unelastischen Körpern. Bei beiden tritt sofort nach dem Stoße an der Berührungsstelle eine Abplattung oder Einbauchung, je nach der relativen Oberflächenform der beiden Körper, ein. Bei vollkommen unelastischen, weichen Körpern bleibt diese Deformation bestehen; bei elastischen hingegen wird alsbald durch die Elastizität die frühere Form wiederhergestellt, es bleibt von der Deformation keine merkbare Spur zurück, solange nicht eine gewisse Grenze überschritten worden ist. In beiden Fällen wird ein Teil der kinetischen Energie für die Molekularverschiebung der Körper verbraucht und geht als äußerlich in die Erscheinung tretende lebendige Kraft verloren; unter Umständen kann hierbei die ganze lebendige Kraft vernichtet werden, wie schon früher an Beispielen gezeigt wurde.

Die Stoßwirkungen sind wesentlich andere bei unelastischen und elastischen Körpern. Unelastische Körper bewegen sich nach einem geraden zentralen Stoße zusammen wie ein einziger Körper weiter. Je nachdem die Bewegungsrichtung beider Körper gleich oder entgegengesetzt war, summieren sich die lebendigen Kräfte und die Richtung bleibt dieselbe, oder beide Körper bewegen sich nach dem Stoße in der Richtung desjenigen, der vorher die größere lebendige Kraft besaß; die resultierende lebendige Kraft ist gleich der Differenz der Einzelenergien vor dem Stoß, die resultierende Geschwindigkeit ist gleich dem Quotienten aus der Summe bei ursprünglich gleicher, oder aus der Differenz bei entgegengesetzter Bewegungsrichtung der einzelnen Körper, dividiert durch die Summe der Massen beider Körper. Haben beide Körper gleiche Massen und gleiche Geschwindigkeit bei entgegengesetzter Richtung, so wird die resultierende Geschwindigkeit $= 0$; die gesamte kinetische Energie verschwindet. Dasselbe findet statt, wenn ein Körper in Ruhe und unbeweglich ist. Bei vollkommen elastischen Körpern wird durch die elastische Rückwirkung sofort nach dem Stoß nicht nur die Deformation wieder aufgehoben, sondern auch dieselbe Kraftleistung nach außen abgegeben, die vorher zu der Deformation aufgewendet worden war. Da es aber vollkommen elastische feste Körper nicht gibt, findet auch stets ein Energieverlust bei den im gewöhnlichen Sinne elastischen Körpern statt. Eine Elfenbeinkugel wird, in einer luftleeren Gasglocke einmal auf eine Elfenbeinplatte fallen gelassen, nicht ohne Aufhören zu derselben Höhe wieder aufspringen und niederfallen; die Höhe wird vielmehr immer geringer, und schließlich, wenn die gesamte lebendige Kraft durch die vielen kleinen Deformationsarbeiten bei den einzelnen Stößen, die durch die elastischen Rückstöße nicht jedesmal vollständig wieder ersetzt worden sind, aufgezehrt ist, bleibt die Kugel auf der Platte liegen. Stoßen zwei vollkommen elastische Körper mit gleicher Bewegungsrichtung zusammen, so finden ganz andere Vorgänge statt als bei unelastischen. Einfach gestaltet sich die Sache bei Körpern mit gleichen Massen. Dies ist bei Billardkugeln zu beobachten, wenn auch die Richtigkeit dieser Beobachtung durch die Reibung der Bälle am Billardtuch beeinträchtigt wird. Gleiche Massen vertauschen nach dem Zusammenstoße ihre Geschwindigkeiten. Bewegten beide Körper sich

in derselben Richtung, so behalten beide nach dem Stoße ihre Richtung bei, und die Geschwindigkeit des vorderen Körpers erhöht sich auf das Maß der früheren Geschwindigkeit des hinteren, und dieser folgt mit der vorherigen Geschwindigkeit des vorderen Körpers nach; beide Körper entfernen sich also nach dem Stoße wieder mit derselben Geschwindigkeit voneinander, mit der sie sich vorher näherten. Befand sich der eine Körper in Ruhe, so bewegt er sich nach dem Stoße mit der Geschwindigkeit des vorher bewegten Körpers fort, während dieser in Ruhe übergeht. Hatten beide Körper genau entgegengesetzte Bewegungsrichtung, so prallen sie nach dem Stoße in entgegengesetzter Richtung wieder auseinander und zwar jeder mit der Geschwindigkeit, die vorher der andere Körper hatte.

Stößt ein vollkommen elastischer Körper senkrecht auf einen anderen, ruhenden, welcher im Verhältnis zu ihm sehr groß ist oder feststeht, z. B. eine Wand, so fährt der kleine Körper mit seiner früheren Geschwindigkeit in umgekehrter Richtung zurück.

Beim Zusammenstoße ungleicher Körper hängen die folgenden Bewegungen von dem Verhältnisse der Massen und der Geschwindigkeiten ab; hierfür findet nicht mehr eine so einfache Beziehung statt, wie für die unelastischen Körper.

Die Wirkung des Stoßes, besonders des unelastischen, wird vielfach praktisch angewendet, und zwar wird je nach den Umständen eine gerade entgegengesetzte Wirkung bezweckt, die Deformation eines Körpers oder die Fortbewegung. Beim Schmieden des Eisens soll die lebendige Kraft des niedergeschwungenen Schmiedehammers oder des Dampfhammers eine bestimmte Deformation oder Umbildung der Gestalt des glühenden Eisens bewirken; hierbei soll möglichst wenig von der Energie des bewegten Hammers auf nutzlose Bewegung des Ambosses oder der Chabotte (Untersatz) des Dampfhammers verwendet werden, da dieser Arbeitsanteil nicht nur für die Nutzwirkung verloren geht, sondern auch die Fundamente erschüttert. Der Untersatz, auf welchem das Schmiedestück liegt, soll also im Verhältnis zur Masse des Hammers sehr groß sein. Das Gegenteil findet statt z. B. beim Rammen. Hier soll die lebendige Kraft einer bewegten Masse dazu benutzt werden, den Widerstand gegen die Bewegung eines ruhenden Körpers in der Richtung des bewegten unter möglichster Vermeidung schädlicher Deformation zu überwinden. Zu diesem Zwecke muß z. B. die Masse einer Pflasterramme gegen den zu rammenden Pflasterstein, oder die Masse des Rammbärs einer Kunstramme gegen den einzurammenden Pfahl möglichst groß sein.

Die Stoßzeit, d. h. die Zeit, während welcher die lebendige Kraft übertragen wird, ist meist außerordentlich gering. Sie hängt von der Größe und der Beschaffenheit der Körper ab. Für zwei Stahlkugeln von 13 mm Durchmesser und einer Geschwindigkeit von 295 mm beträgt die Stoßdauer 0,0014 Sekunde. Die Stoßkraft wird wegen der minimalen, sowie meist auch unbestimmbaren Zeitdauer der Wirkung nicht in skgm, sondern nach der Leistung als Größe der Arbeit mit mkg angegeben; für die bei weitem am meisten vorkommenden praktischen Anwendungsarten wird die Leistung direkt durch das Produkt der fallenden Masse (Rammklotz) und Fallhöhe (in m) ausgedrückt.

Rammen. Für die verschiedensten Tiefbauarbeiten wird das Einschlagen einzelner Pfähle oder ganzer Reihen von solchen oder von Bohlenwänden erforderlich. Der einfachste Fall, der bei Anlegebrücken und auch häufig bei gewöhnlichen Gebäuden vorkommt, ist die Herstellung eines Pfahlrostes als Fundament, wenn der Boden nicht tragfähig oder an verschiedenen Stellen von ungleichmäßiger Festigkeit ist. Es werden dann eine Anzahl starker Pfähle durch den schlechten Boden so weit eingeschlagen, daß sie mit dem unteren Ende in festem Boden stehen. Auf diesen Pfählen wird dann ein horizontaler Rahmen aus kräftigen Längs- und Querbalken befestigt, welcher die Mauern oder sonstigen Baukonstruktionsteile trägt.

Rohrleitungen für Gas oder Wasser müssen zuweilen streckenweise durch sumpfige, moorige Wiesen, frühere Flußarme oder Gräben, z. B. alte Festungsgräben, gelegt werden, die mit losem Boden aufgefüllt sind. Durch stellenweise Senkungen des Bodens unter der Leitung können Rohrbrüche entstehen, die für die Beleuchtung oder Wasserversorgung einer Stadt die schlimmsten Folgen haben können. In solchen Fällen werden, wenn das Herausnehmen des weichen moorigen oder lose aufgefüllten Bodens und Ersetzen durch

fest eingestampften und geschlämmten Sand wegen zu großer Tiefe nicht angängig ist, in regelmäßigen Entfernungen, z. B. einmal pro Rohrlänge von 4 m, Pfahljoche aus je zwei Pfählen, einer rechts und einer links, bis in den unteren, festen Boden gerammt, und die Rohre an kurzen, auf den Pfählen befestigten Querhölzern aufgehängt.

Für Schleusenkammern und Docks müssen häufig zur Herstellung der Wände ringsherum zwei doppelte Reihen Pfähle dicht aneinander eingerammt werden, zwischen denen durch Pumpmaschinen das von unten andringende Wasser fortwährend ausgepumpt und so die Sohle für die Herstellung von Mauerfundament und Umfassungsmauern wasserfrei gehalten wird.

Alle Rammen beruhen auf demselben Prinzip: die lebendige Kraft einer in Bewegung begriffenen Masse mit einem Stoß auf einmal auf einen Pfahl zu übertragen und diesen hierdurch in den Boden einzuschlagen.

Die einfachste Ramme für kleinere Leistungen ist die Handramme, ein schwerer Holzklotz mit zwei oder vier seitlichen Handgriffen, an denen zwei oder vier Männer anfassen können; sie wird zum Einschlagen von Zaunpfählen verwendet. Für etwas größere Leistungen dient die Zugramme, bei der das Gewicht des Rammklotzes wie die Fallhöhe größer sind, 4, 6 bis 10 Mann ziehen gleichmäßig im Tempo an einzelnen Stricken, die an einem Tau befestigt sind, welches, über eine Rolle laufend, den Rammklotz trägt. Letzterer ist durch einen Ansatz an der hinteren Seite zwischen zwei Pfählen, den sogenannten Läuferruten, geführt und fällt nach dem jedesmaligen Anziehen senkrecht frei herab auf den Pfahl. Bei diesen Zugrammen ist der Rammbär gewöhnlich 100—300 kg schwer.



40. Dampframme.

Mit noch schwererem Rammklotz und bedeutend größerer Fallhöhe arbeitet die Kunstramme. Die Anordnung ist genau wie bei der in Abb. 40 dargestellten Dampframme, nur daß die Windetrommel, über welche die Kette läuft, nicht von einer Dampfmaschine, sondern mittels Kurbeln von Menschenkraft gedreht wird. Die Kettentrommel wickelt die Kette auf, welche, über eine am oberen Ende des Gerüstes angebrachte Rolle laufend, den Rammbär trägt. Derselbe ist mittels einer Schere befestigt; ist er hochgezogen, so wird von unten durch einen Ruck an einem Strick die Schere geöffnet, und der Bär fällt, von den Läuferruten geführt, frei herab. Dann wird das Ende der Kette herabgezogen, die Schere wieder an dem Rammbär befestigt und dieser mit der Winde hochgezogen. Das übliche Gewicht des Rammbärs ist 400—1000 kg, die Fallhöhe von Flur bis Unterkante des hochgezogenen Rammklotzes 7—13 m.

Ganz ebenso in der Anordnung ist die in Abb. 40 dargestellte **Dampframme** (von Menck & Hambrock in Altona); mit derselben werden zwei bis drei Schläge pro Minute geleistet, der Rammbär ist 600—1400 kg schwer und die Fallhöhe 8—13 m.

Anstatt der beschriebenen Anordnung mit „rücklaufender Kette", welche nach jedem Rammschlage niedergezogen werden muß, wodurch Zeit verloren geht, wendet man auch die „endlose Kette" an. Hierbei läuft die aus flachen Gliedern nach Art der Gallschen Gelenkkette bestehende endlose, also schleifenförmig in sich selbst zurückkehrende Kette über zwei Leitrollen, von denen die eine am oberen Ende des Gerüstes, die andere unten angebracht ist, und über eine dritte Rolle, die auf der Welle des Windewerkes sitzt. Diese ist mit Zähnen versehen, welche in die Kettenglieder eingreifen und bei der Bewegung der Winde die Kette mitnehmen. Der Teil der endlosen Kette zwischen den beiden Leitrollen bewegt sich kontinuierlich nach oben und geht durch eine Tasche des Rammbärs; durch Vorschieben eines in dem Bär befindlichen Daumens in eine Kettenlücke wird die Verbindung zwischen Kette und Bär hergestellt und letzterer mit in die Höhe genommen. In beliebiger Höhe wird durch Abdrückgriffe, die in die Läuferrute eingesteckt werden, der Daumen selbstthätig zurückgezogen, worauf der Rammbär herabfällt, um gleich darauf nach Vorschieben des Daumens wieder gehoben zu werden.

Man hat auch noch **Dampframmen mit direkt wirkendem Rammbär**; bei diesen wird der Bär direkt durch Dampfdruck gehoben und nach Abstellen des Dampfes frei herab fallen gelassen.

Die Zentrifugalkraft.

Schleuder. Eisenbahn in Kurven. Brauns Geschwindigkeitsmesser. Zentrifugalregulator. Zentrifugen. Abplattung der Erde. Entstehung der Saturnringe. Verringerung der Schwerkraft.

Betrachten wir bei naß-schmutzigem Wetter einen mit einiger Geschwindigkeit fahrenden Wagen, so sehen wir, wie fortwährend von den Rädern mit ziemlicher Vehemenz Schmutzspritzer nach den verschiedensten Richtungen abgeschleudert werden, so daß die Schutzbleche bald dicht mit Schlamm bespritzt sind; mancher Spritzer trifft auch unliebsamerweise einen Passanten oder fliegt, bei nicht ausreichenden Schutzblechen in den offenen Wagen. Bei allen Radfahrer-Wettrennen auf geschlossener, runder, oder elliptisch abgerundeter Bahn sehen wir, daß die Fahrer in den gekrümmten Strecken ganz schräg gegen die Vertikale geneigt dahinsausen, um so schräger, je größer die Schnelligkeit ist. Ein Parforcereiter im Zirkus liegt ebenso mit seinem Pferde schräg gegen den Mittelpunkt der Manege (Abb. 41). Die Ursache dieser und noch mancher zu beobachtenden Erscheinungen ist die **Zentrifugalkraft**.

Die Wirkungen der Zentrifugalkraft sind schon sehr lange bekannt und angewendet, die Schleuder und die Wurfmaschine beruhen auf derselben; David tötete durch einen Steinwurf mit der Schleuder den Riesen Goliath.

Wenn man einen Stein an einer Schnur im Kreise herumschwenkt, so fühlt man in der Schnur eine Zugkraft auftreten, und bei Vergrößerung der Umdrehungsgeschwindigkeit kann es geschehen, daß der Faden reißt; der Stein fliegt alsdann in gerader Richtung a b tangential zu dem Kreise oder senkrecht zu der Richtung der Schnur im Augenblicke des Zerreißens fort (s. Abb. 42).

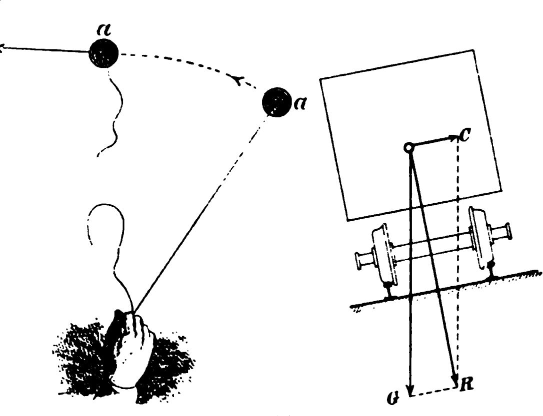
Es ist nun keineswegs eine besondere Kraft, die bei dem Kreisen des Steines den Faden anzieht und unter Umständen zerreißt, oder das Fortfliegen des Steines bewirkt, sondern nur eine notwendige Folge gegebener Bedingungen für die lebendige Kraft oder Trägheit eines Körpers. Der durch irgend welchen äußeren Antrieb in kreisförmige Rotation versetzte Körper ist durch das Beharrungsvermögen in jedem Augenblick bestrebt, in tangentialer Richtung geradlinig sich fortzubewegen. Hiervon wird er durch die von dem festen Mittelpunkte ausgehende Schnur gehindert. Dieselbe übt also eine ununterbrochene Zugkraft radial nach dem Mittelpunkt des Kreises (zentripetal) aus. Die Trägheit des Körpers widersetzt sich derselben und äußert sich als entgegengesetzte Zugkraft;

beide müssen gleich sein und sich das Gleichgewicht halten, denn sonst würde der Körper sich in einer Spirale vom Mittelpunkte entfernen, oder sich dem Mittelpunkte nähern. Die Zentrifugalkraft ist also eine Erscheinung der tangential gerichteten Energie des Körpers, welcher er nicht folgen kann. Eine besondere Energie ist außer dieser nicht vorhanden; es tritt keine radial nach außen wirkende Kraft auf, wenn der Faden zerreißt oder die Schnur der Schleuder gelöst wird, und der Körper fliegt nicht radial fort, wie es unter der Einwirkung bei einer thatsächlich wirksamen besonderen zentrifugalen Kraft geschehen würde, sondern er bewegt sich senkrecht zu dieser Richtung.



41.

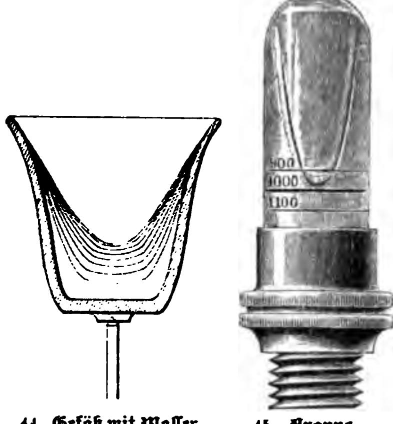
Die Größe der Zentrifugalkraft entspricht dem Maße für die lebendige Kraft bewegter Massen: sie wächst im Verhältnisse des Quadrates der Geschwindigkeit; bei gleicher Geschwindigkeit ist sie dem Radius des Kreises umgekehrt proportional, d. h. bei einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit sind Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft um so größer, je kleiner der Krümmungsradius der Bahn ist. Dies ist leicht einzusehen, denn je stärker die Bahn gekrümmt ist, desto mehr wird der Körper in jedem Augenblick von seinem tangentialen Flugbestreben abgelenkt. Die oben aufgeführten Beispiele erklären sich leicht. Der an der Radfelge eines Wagens vom Boden anhaftende Schmutz sitzt durch Adhäsion an dem Rade; wird die Zentrifugalkraft größer, so wird die Adhäsion überwunden und der Schlamm fliegt tangential vom Rade fort. Auf den bei schneller Bewegung in gekrümmter Bahn befindlichen Radfahrer oder Reiter wirkt das Beharrungsvermögen, das Bestreben, die Kreisbahn tangential zu verlassen; sie wollen aber diesem Bestreben entgegen die gekrümmte Bewegung fortsetzen. Durch die fast selbstthätig und unwillkürlich eingenommene, nach der Geschwindigkeit größere oder geringere Neigung ihrer Vertikalachse und Verlegung des Schwerpunkts nach innen wird nun der Zentrifugalkraft ein Widerstand entgegengesetzt; die Körper lehnen sich gleichsam gegen die Zentrifugalkraft an, wie ein Wanderer gegen starken seitlichen Wind. Damit bei der schrägen Lage des Fahrrades dieses doch nicht seitlich vom Boden abgleitet, sind die Rennbahnen in den gekrümmten Teilen schräg, nach außen ansteigend, angelegt, so daß für eine angenommene mittlere Geschwindigkeit und Neigung der Vertikalachse des Rades diese senkrecht zum Boden bleibt. Ebenso erhält bei Eisenbahnen in Kurven die nach der äußeren Seite der Kurve liegende Schiene eine Überhöhung, um ein Andrücken der Radkränze an die äußere Schiene durch die Zentrifugalkraft zu verhindern, durch die bei großer Geschwindigkeit die Wagen aus dem Geleise hinausgeschleudert werden könnten. Die Überhöhung ist so eingerichtet, daß bei einer gewissen mittleren Geschwindigkeit der Druck der Wagen unter dem gemeinsamen Einflusse der senkrecht nach unten wirkenden Schwere G und der horizontal nach außen wirkenden Zentrifugalkraft C, die Resultierende R senkrecht zu der geneigten Verbindungslinie in der Schienenoberkante gerichtet ist (Abb. 43). Die



42. Bewegung in tangentialer Richtung. 43.

Überhöhung kann nur für eine bestimmte Geschwindigkeit so bemessen sein, daß der Seitendruck auf diese Weise gerade aufgehoben wird. Bei Schnellzügen wird von der überwiegenden Zentrifugalkraft ein Druck der Räder gegen die äußere Schiene, bei langsam fahrenden Güterzügen dagegen ein solcher gegen die innere Schiene der Kurve stattfinden.

Die einfachste Wirkung und Anwendung der Zentrifugalkraft findet bei der schon erwähnten **Schleuder** statt. Ein Stein wird lose in ein Stück Leder gelegt und in diesem mittels zweier Schnüre in schnelle kreisende Bewegung gesetzt; läßt man in einem bestimmten richtigen Augenblicke die eine der beiden Schnüre los, so fliegt der Stein mit großer Geschwindigkeit in bestimmter Richtung fort. Die Anfangsgeschwindigkeit ist gleich der Umfangsgeschwindigkeit im Augenblicke der Lösung der Schnur. Eine solche Anfangsgeschwindigkeit kann man dem Steine durch bloßes Fortschleudern mit der Hand bei weitem nicht erteilen, denn hierbei ist der Kraftantrieb durch die Armmuskeln ein sehr kurzer, fast momentaner; in der kurzen Zeit und auf dem kleinen Wege von der Ausholung des Armes nach hinten bis zur vordersten Lage der nach vorn geworfenen Hand kann dem Steine nicht so viel Energie mitgeteilt werden, wie durch die nach Belieben mehrere Sekunden dauernde, mit immer zunehmender Geschwindigkeit bewirkte Rotation an der Schleuderschnur.



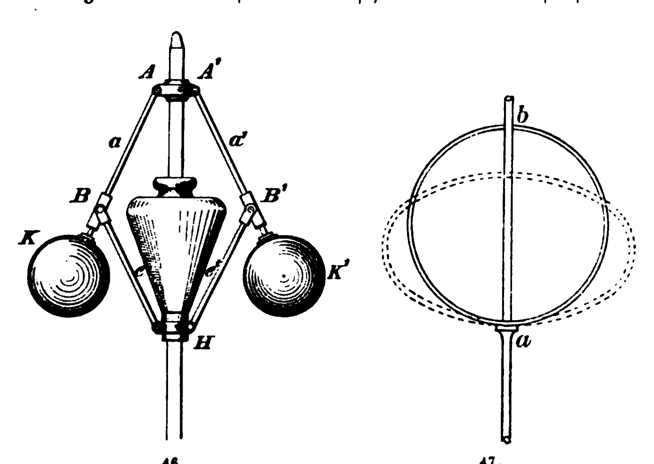
44. Gefäß mit Wasser bei Rotation. 45 Brauns Geschwindigkeitsmesser.

Die Wirkung der Zentrifugalkraft läßt sich noch auf verschiedene andere Weise darstellen. Aus einem Korbe, in dem lose Gegenstände liegen, fallen diese nicht heraus, wenn der Korb mit einiger Geschwindigkeit in senkrechter Ebene herumgeschwenkt wird. Setzt man ein teilweise mit Flüssigkeit gefülltes nach oben sich konisch erweiterndes Gefäß in schnelle Rotation um die vertikale Achse, so steigt die Flüssigkeit an der Wandung des Gefäßes in die Höhe und fliegt sogar über den Rand derselben hinaus (Abb. 44). Hierauf beruht der sehr hübsche und einfache neuere **Geschwindigkeitsmesser** von Dr. **Braun** (Abb. 45). Das geschlossene kleine Glasgefäß hat an seiner Außenseite eine eingeätzte Skala und ist teilweise mit einer Flüssigkeit angefüllt. Das Gefäß wird mit seinem Fußstück in das obere Ende einer vertikalen Welle, deren Umdrehungsgeschwindigkeit kontrolliert werden soll, eingesetzt, so daß es deren Drehung mitmacht, oder bei horizontalen Wellen durch Kegelräder oder Seiltrieb angetrieben. Der Apparat muß stets vertikal stehen. Je nach der Umdrehungsgeschwindigkeit steigt nun die Flüssigkeit in dem Glas an den Wänden in die Höhe, so daß die Oberfläche schließlich eine birnenförmige Gestalt erhält. Je größer die Umdrehungsgeschwindigkeit, desto tiefer liegt der untere Scheitelpunkt der parabolischen Oberfläche, und die an der Glaswand eingeätzte Zahl bei diesem Punkte gibt direkt die Umdrehungszahl pro Minute an; bei der Abbildung beträgt dieselbe also z. B. etwas weniger als 1000. Je nach der Umdrehungszahl, welche die Maschine ungefähr macht, für welche ein Apparat bestimmt ist, wird die Form des Glasgefäßes und die Flüssigkeit bestimmt. Bei der Rotation kann man natürlich die eingeätzten Zahlen nicht lesen; dies schadet aber nichts, man macht den Teilstrich, welcher gerade der richtigen Umdrehungsgeschwindigkeit entspricht, etwas kräftiger, oder markiert ihn mit einer roten Linie; dann kann man ohne Ablesen der Zahlen sofort sehen, wie viel Teilstriche die Flüssigkeit über oder unter dieser Marke steht, wie viel also die Maschine zu langsam oder zu schnell geht.

Eine für den Maschinenbau sehr wichtige Anwendung der Zentrifugalkraft ist der von **James Watt** erfundene und zuerst für seine Dampfmaschinen verwendete **Zentrifugal-Pendelregulator**, welcher in Abb. 46 schematisch dargestellt ist. An der vertikalen Achse hängen in 2 Ösen A A' an festen Armen a a' die Schwungkugeln K K';

die Achse wird durch Räder- oder Riemenantrieb von einer Maschinenwelle in Drehung versetzt. Bei steigender Geschwindigkeit sind die Schwungkugeln bestrebt, auseinander zu schlagen; hierbei müssen sie sich um die Aufhängepunkte drehen, also gleichzeitig sich und die mit Charnieren BB¹ an ihren Armen befestigten Stangen ee' mit der Hülse H heben. Von dieser Hülse aus wird durch ein Hebelgestänge die Dampfeinströmung reguliert in der Weise, daß bei zu hoher Umdrehungszahl die Dampfzuströmung verkleinert und so die Geschwindigkeit der Maschine verringert, bezw. konstant gehalten wird. (Näheres hierüber im III. Teile unter Dampfmaschinen.) Auch bei anderen Kraftmaschinen, z. B. Turbinen, werden Schwungkugelregulatoren verwendet, welche den Zufluß des Wassers je nach der Geschwindigkeit einstellen.

Eine andere Anwendung findet bei den Zentrifugal-Trockenmaschinen oder Schleudertrommeln statt. Dieselben dienen in der Textilindustrie dazu, nasse Gewebe schnell und möglichst vollkommen von ihrem Wassergehalte zu befreien. Wie man von einem nassen Hut die Regentropfen durch bogenförmige Schwenkungen abschleudert, so wird aus nassen Geweben das Wasser durch sehr schnelle Rotation nach außen gedrängt und schließlich abgeschleudert. Die Wirkung dieser Zentrifugal-Trockenmaschinen ist so vollkommen, daß das Zeug in einigen Minuten so trocken ist, wie man es sonst nur durch stundenlange Aufhängung in Trockenkammern erhalten könnte.



46. Zentrifugalregulator. 47. Abplattung einer rotierenden Kugel.

Ganz ähnlich sind die Zentrifugen für Zuckerfabriken zum Abscheiden der Melasse von dem körnigen Rohzucker. Auf demselben Prinzip beruhen die Separatoren, durch deren allgemeine Einführung die Milchwirtschaft einen ganz anderen Charakter erhalten hat, und von denen des weiteren in Band IV unseres Werkes die Rede ist. In denselben wird nun durch rasche Drehung (bis zu 7000 in der Minute) in wenigen Augenblicken aus der Milch der leichte, fettreiche Rahm von der schwereren wässerigen Milchflüssigkeit geschieden. Aber auch qualitativ haben sie eine bedeutend größere Leistungsfähigkeit gegenüber dem älteren Entrahmungsverfahren, denn sie ziehen viel vollkommener den Fettgehalt aus der Milch, wodurch sich eine erheblich größere Ausbeute an Butter ergibt.

Auch die Gewinnung des sogenannten Schleuderhonigs aus den Waben geschieht, wie schon der Name andeutet, durch Zentrifugalschleudern. Eine höchst wichtige Anwendung der Zentrifugalkraft stellen noch die sehr viel gebrauchten Zentrifugalpumpen für Wasserförderung dar; dieselben werden weiterhin bei den Pumpen besprochen.

Am großartigsten sind die Wirkungen der Zentrifugalkraft in der Natur: die im vorigen Kapitel besprochene, mittels des Pendels nachgewiesene Abplattung der Erde an den Polen rührt von der Zentrifugalkraft her. In einer weitentlegenen Epoche der Erdbildung war die Erdmasse plastisch; bei der Achsendrehung mußte durch die zentrifugale Wirkung diese Masse, entgegen der nach dem Mittelpunkt gerichteten Schwerkraft, von der Achse in senkrechter Richtung fortstreben und zwar um so mehr, je größer der Rotationsradius war, also am stärksten am Äquator, während bei den Polen die Zentrifugalkraft 0 ist. Das hierdurch entstehende Anschwellen der Erdkugel um den Äquator mußte eine Zusammenziehung der Masse in der Achsenrichtung zur Folge haben, die schon erwähnte Abplattung, derzufolge der Poldurchmesser um $^1/_{299}$ kürzer ist, als der Durchmesser am Äquator.

Folgender Versuch bestätigt die Abplattung eines nicht vollkommen festen Körpers durch Rotation. Ein elastischer, dünner, genau in Kreisform gebogener Stahlstreifen (Abb. 47) wird auf einer Achse a b unten bei a befestigt, während er oben nur mit einem Loch lose über dieselbe gesteckt ist. Wird die Achse in schnelle Rotation versetzt, so verändert der Kreis seine Gestalt, und zwar wird er zu einer Ellipse, wie in der Abbildung punktiert gezeichnet.

Bei anderen Planeten, die größer sind als die Erde, macht sich die Wirkung der Zentrifugalkraft in noch höherem Maße geltend, so z. B. beim Jupiter und besonders beim Saturn. Bei diesem hat die Zentrifugalkraft am Äquator die Schwerkraft überwunden, so daß sich ein Streifen der plastischen oder flüssigen Masse von dem Himmelskörper ablöste, der seitdem als der bekannte Ring in der Äquatorialebene den Saturn umgibt. Auf ähnliche Weise sind wahrscheinlich die Monde der Planeten, also auch der unzertrennliche Begleiter der Erde, entstanden, die von den Dichtern besungene Luna, die nachts mit sibernem Scheine ihrer Mutter, der Erde, das Sonnenlicht zu ersetzen sucht. Wenn nämlich in dem sich ablösenden Äquatorialstreifen die Masse nicht gleichmäßig verteilt ist, sondern an einer Seite, oder an mehreren Punkten überwiegt, so sammelt sich hier noch mehr Masse an; die Zentrifugalkraft wirkt hier stärker, bis schließlich der Ring an einer oder mehreren schwachen Stellen zerreißt und die ganze Masse sich um den einen oder mehrere Punkte als getrennte Kugeln sammelt, welche nun unter dem gemeinsamen Einfluß der ursprünglichen Fliehkraft und der Anziehungskraft des Hauptkörpers ihre Bahn um das Muttergestirn verfolgen.

Dieser Vorgang läßt sich nach Plateau in folgender einfachen Weise nachahmen. Man bringt einen recht großen Tropfen einer Mischung von Terpentin, Wachs und dergleichen, welche genau das spezifische Gewicht 1 hat, in heißes Wasser, so daß der Tropfen in diesem (nicht auf der Oberfläche) gerade schwimmt und flüssig bleibt. Dieser Tropfen wird genau in die Mittelachse des Wassergefäßes dirigiert und letzteres hierauf in Rotation versetzt. Das Wasser beginnt allmählich an der Rotation teilzunehmen und ebenso die flüssige Wachskugel. Bei genügender Geschwindigkeit fängt dieselbe an, in der Horizontalebene anzuschwellen und dafür in der Drehachse sich abzuplatten, bis sich ein zusammenhängender Ring ablöst und getrennt von dem Haupttropfen diesen umgibt. Lag jedoch der Mittelpunkt des Tropfens nicht genau in der Mitte, so entsteht nur an einer Stelle am Äquator eine Ausbauchung, welche sich als einzelner kleiner Tropfen, oder Mond, vom Zentralkörper löst. Ebenso zerreißt der Ring, wenn die Achse ein wenig aus der Rotationsachse des ganzen Glases verschoben wird, indem sich an der Seite, welche von der Rotationsachse am weitesten entfernt ist, wo also die Zentrifugalkraft ihre größte Wirkung ausübt, die Masse sich sammelt und dort, nachdem der Ring an der entgegengesetzten Seite zerrissen ist, einen einzelnen neuen Tropfen bildet.

Durch die Zentrifugalkraft wird also die Schwerkraft teilweise aufgehoben. Am Äquator sind beide Kräfte gerade entgegengesetzt gerichtet, und die Verminderung der Schwerkraft beträgt hier 3,4 cm, so daß die Intensität der Schwere anstatt, wie früher angegeben, 9,780 m pro Sekunde, ohne Erddrehung 9,814 m betragen würde. Die Größe der Fliehkraft am Äquator ist $^1/_{289}$ der Schwerkraft; würde die Erddrehung 17 mal schneller erfolgen, so würden Schwere und Fliehkraft sich gerade aufheben, da ja, wie bei allen Bewegungen, die Zentrifugalkraft im Verhältnis des Quadrates der Geschwindigkeit wächst. Die Körper würden also am Äquator gewichtslos sein, ein in die Höhe geworfener Stein würde nicht zur Erde zurückkehren, sondern, wie der Mond, die Erde umkreisen oder, wenn die erteilte Anfangsgeschwindigkeit so groß war, daß der Körper ganz außerhalb der Anziehungskraft der Erde gelangte, den Weltraum durcheilen, bis er in den Einwirkungsbereich eines anderen Himmelskörpers käme.

Die Zentrifugalkraft kann Ursache zu den größten Unglücken und verheerendsten Wirkungen werden. Schon bei den erwähnten Zentrifugen besitzt der rotierende Kessel eine bedeutende lebendige Kraft; übersteigt die zentrifugale Spannung die Festigkeit des Materials, so fliegen die Stücke mit großer Kraft und Geschwindigkeit auseinander, wie der im Kreise geschwungene Stein fortfliegt, wenn die Schnur zerreißt. Ist das umgebende Gehäuse nicht stark genug, den Anprall der fortgeschleuderten Bruchstücke auszuhalten, so wird dasselbe zertrümmert und die Stücke sausen zerstörend durch den Fabrikraum. Schon manchesmal ist auch durch das Zerreißen eines Schleifsteines viel

Unheil angerichtet worden, weshalb jetzt größere oder schnellkreisende Schleifsteine mit einem kräftigen Schutzgehäuse umgeben werden, welches nur eine passende Lücke hat, um das Werkzeug an den Schleifstein anzulegen. Viel schlimmer aber sind noch die Wirkungen, wenn ein großes Schwungrad einer Dampfmaschine zerreißt, sei es durch Überschreitung der zulässigen Geschwindigkeit oder Fehler in dem Materiale, z. B. Gußblasen in den Armen oder der Nabe. Mit der unwiderstehlichen Kraft der in dem Rade aufgespeicherten Energie sausen die mehrere Zentner schweren Bruchstücke durch die Luft, zerstören Maschine und Einrichtung, durchschlagen Mauern, fliegen im weiten Bogen, das Dach zertrümmernd nach außen, hier an den Gegenständen, die ihrer Flugbahn entgegenstehen, die Zerstörung fortsetzend. Glücklicherweise weiß man durch genaue Berechnungen der auftretenden zentrifugalen Spannungen und Anpassung der Stärke, Form und des Materials der Schwungräder solchen Unglücken vorzubeugen, so daß dieselben selten sind; aber es ist doch schon manches Werk durch ein zerbrochenes Schwungrad oder eine große Riemenscheibe oder Seilscheibe zerstört und manches Menschenleben vernichtet worden.

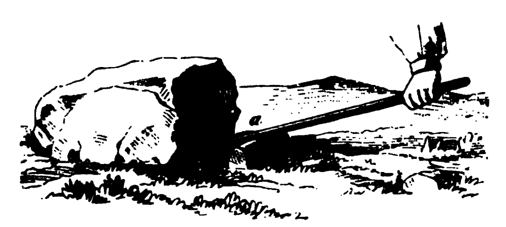
Die Massenanziehung oder Schwerkraft und die Zentrifugalkraft sind es, welche die Himmelskörper geformt haben, und nach deren Gesetzen ihre Bewegungen in regelmäßigen Bahnen erfolgen, seit vor unvorstellbaren Zeiträumen ein erster unbekannter und stets unerforschbar bleibender Anstoß die Urmaterie der Welt in Bewegung gesetzt hat. Auch die Schwerkraft, wie die Zentrifugalkraft, die ja nur eine besondere Wirkungsform der Trägheit ist, kennen wir ihrem Wesen nach noch nicht, aber die Gesetzmäßigkeit ihrer in die Erscheinung tretenden Wirkungen ist erforscht. Auf Grund dieser nach vielen Beobachtungen und Erfahrungen aufgestellten Gesetze vermögen wir Erscheinungen und Ereignisse im Laufe der Himmelskörper zu berechnen und vorherzusagen, die erst nach Jahrhunderten und Jahrtausenden eintreten werden, ebenso wie wir in der fernen Vergangenheit geschichtlich unbestimmte oder zweifelhafte Zeitpunkte in manchen Fällen genau feststellen können mit Hilfe von zufälligen Angaben aus dieser Zeit über besondere astronomische Ereignisse, z. B. Sonnenfinsternisse.

Die Hebelgesetze und ihre Anwendung. Die technischen Wagen.

Hebevorrichtungen der Alten. Der Hebel. Gleicharmiger Hebel. Druckhebel, Wurfhebel. Hebelgesetz. Winkelhebel. Dezimalwage. Zentesimal-Brückenwage. Automatische Wagen.

Wenn wir die Mitteilungen über die großartigen Bauwerke aus der alten Zeit, die Tempel der Babylonier und Assyrer, die Pyramiden der Ägypter, den Koloß von Rhodus, die großartigen Wasserleitungsaquädukte der Römer u. a. lesen, oder in der glücklichen Lage gewesen sind, die noch erhaltenen Reste dieser staunenswerten Denkmäler der Baukunst des Altertums zu betrachten, so drängt sich uns die Frage auf: wie war es bei dem damaligen Stande der Technik möglich, solche Kolossalbauwerke zu errichten? Bestehen doch z. B. die vor etwa fünf Jahrtausenden erbauten ägyptischen Pyramiden aus behauenen Blöcken von einem Gewicht bis zu 100 000 kg — also entsprechend einer Ladung von zehn Eisenbahn-Doppelwaggons — welche zum Teil bis zu 150 m Höhe geschafft werden mußten. Heute bilden die Hebevorrichtungen einen sehr wichtigen Ausrüstungsteil der großen Etablissements der Eisen- und Stahlindustrie. Alle haben mächtige, durch Dampfkraft, Elektrizität oder Druckwasser betriebene Kräne zum Heben und Transportieren und schließlich direkten Verladen schwerer Stücke auf besonders konstruierte Eisenbahnwagen, und bei überseeischem Versand spielt eine wichtige Rolle für die Wahl des Transportweges die Frage, welcher Hafen die besten und leistungsfähigsten Hebevorrichtungen zum Überladen aus dem Eisenbahnwagen in das Seeschiff hat. Vor 5000 Jahren aber hatten die damaligen Baumeister keine Kräne und keine Dampfkraft, keine Eisenbahn und keine hydraulischen Aufzüge. Mit den einfachsten Hilfsmitteln mußten die ungeheueren Massen bewegt werden, wozu allerdings anderseits ungezählte Fronarbeiter zur Verfügung standen. Eines der am nächsten liegenden Hilfsmittel ist jedenfalls die Hebelkraft gewesen.

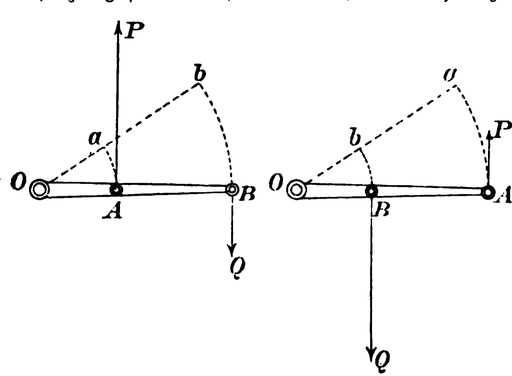
Die Benutzung des Hebels zum Heben von Lasten erscheint uns so selbstverständlich, daß man meinen könnte, die Idee dazu wäre dem Menschen angeboren. Kinder ohne Überlegung, Arbeiter von der denkbar kleinsten Intelligenz benutzen den Hebebaum, die Brechstange, ohne vielleicht je darüber nachzudenken, wie es kommt, daß mit diesem einfachen Werkzeug so bedeutende Kraftleistungen zu bewirken sind, und wie es zu erklären ist, daß der schwere Stein in Abb. 48, der mit der Hand nicht von der Stelle zu rücken ist, mit dem Hebebaum leicht gelüftet und ruckweise fortbewegt werden kann. Und wenn wir den Mann fragen, der in recht geschickter und zweckmäßiger Weise den Hebel zu benutzen versteht, wie es möglich sei, mittels desselben eine so große Kraft auszuüben, so wird er uns vielleicht erstaunt ansehen und meinen, das sei doch klar, an dem Hebebaum habe man eben mehr „Druck" (von den Arbeitern wird in der That vielfach eine solche Anordnung, wie in dem Bildchen skizziert, als „Druck" bezeichnet); aber eine befriedigende Erklärung werden wir in den meisten Fällen nicht erhalten.



48. Zweiarmiger Hebel.

In der That wird aber durch ein einfaches Mittel eine bedeutend größere Kraftwirkung erzielt. Und doch gilt allgemein die Regel, daß jede Leistung gleich der aufgewendeten Arbeit sei; das Prinzip von der Konstanz der Energie ist für die einfachste Vorrichtung ebenso gültig, wie für die Bewegungsgesetze der Weltkörper. Eine Vermehrung der aufgewendeten Energie durch den Hebel oder die schiefe Ebene kann niemals erreicht werden. Im folgenden werden wir den Zusammenhang zwischen Kraft und Leistung, die Wirkungsweise des Hebels und der von ihm abgeleiteten sogenannten einfachen Maschinen kennen lernen.

Der Hebel. Ein Hebel ist allgemein ein unbiegsamer, um einen festen Unterstützungspunkt drehbarer Stab, an welchem zwei Kräfte in entgegengesetztem Drehungssinne angreifen. Die eine Kraft wird gewöhnlich kurzweg als Kraft, die andere, welche dieser Widerstand entgegensetzt, als Last bezeichnet. Liegen die Angriffspunkte von Kraft und Last auf derselben Seite des Drehpunktes, so ist der Hebel ein einarmiger (Abb. 49 u. 50); liegt der Drehpunkt zwischen beiden, so haben wir den zweiarmigen Hebel (Abb. 51). Die Stücke oder Längen vom Drehpunkte bis zum Angriffspunkte der Kräfte heißen Kraftarm und Lastarm, wenn die Richtung der Kräfte senkrecht zu diesen steht, in den Abb. 49—51 also O A und O B. Wirken aber die Kräfte in anderer Richtung, so sind nicht die Hebelarme selbst, sondern die vom Drehpunkt nach den Kraftrichtungen gezogenen Senkrechten, also in Abb. 52 O A′ und O B′, die Kraftarme. Daß die Kräfte beim Hebel nicht gleich zu sein brauchen, um sich das Gleichgewicht zu halten, geht ohne weiteres aus dem Beispiel Abb. 48 hervor; der Arbeiter hält den schweren Stein in der Schwebe, und er weiß, daß dies um so leichter ist, je näher der Unterstützungspunkt a des Hebels dem Auflagerpunkt b der Last gerückt wird, oder je länger der Hebebaum ist.

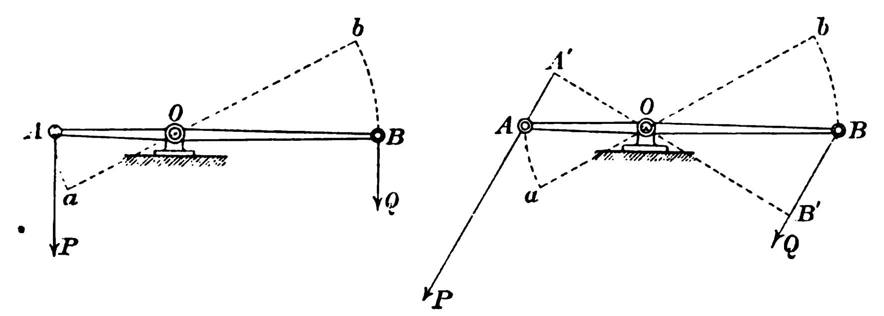


49 u. 50. Einarmige Hebel.

Schon in einem früheren Kapitel sind die Gleichgewichtsbedingungen für den Hebel als eine Anwendung des Satzes von den statischen Momenten dargelegt worden. Ein für sich selbständiges Hebelgesetz gibt es nicht; der Satz vom Hebel stellt vielmehr nur eine besondere Form des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte dar. Es lautet: die beiden Kräfte halten sich das Gleichgewicht, wenn das Produkt Kraft × Kraftarm = Last × Lastarm ist;

P.OA = Q.OB Abb. 49 bis 51, oder P.OA' = Q.OB' bei Abb. 52. Hieraus erklärt sich ohne weiteres die Wirkung des Hebels in Abb. 48; je länger das Hebelende ist, an dem die Kraft, also der Arbeiter, angreift, im Verhältnis zu dem Lastarm, dem Hebelende a b, desto größer kann die Last sein, die von der Kraft im Gleichgewicht gehalten wird. Ist z. B. das Stück a b = 20 cm, und der Kraftarm 1 m lang, so kann eine Last von 50 kg durch eine Druckkraft am anderen Ende von 10 kg in der Schwebe gehalten werden.

Hiermit ist die Bedingung für das Gleichgewicht am Hebel gegeben; es wird aber fast in allen Fällen nicht die Haltung eines ruhigen Gleichgewichts durch Hebel und alle anderen Maschinen bezweckt, sondern eine Bewegung, das Heben einer Last oder die Überwindung eines Widerstandes, kurz die Leistung einer Nutzarbeit. Das entsprechende



51. Zweiarmiger Hebel. 52. Zweiarmiger Hebel mit schief wirkenden Kräften.

Bewegungsgesetz für den Hebel heißt: die Produkte Kraft × Kraftweg und Last × Lastweg sind gleich; P. Aa = Q. Bb in Abb. 49 bis 52. Dies ist nur ein anderer Ausdruck für den ersten Satz; die vorstehende Formel kann aus der ersten direkt geometrisch abgeleitet werden. Hieraus folgt, daß jedem Gewinn an Kraft ein entsprechender Verlust an Geschwindigkeit (also an Weg oder Zeit) entgegensteht. Wie wir früher gesehen haben, wird die Größe einer Arbeitsleistung durch das Produkt aus Kraft und senkrechter Hubhöhe dargestellt. Es ist also bei jeder Hebelbewegung die Kraftleistung gleich der überwundenen Arbeit; die Hebelgesetze stimmen also mit dem Prinzip von der Konstanz der Energie überein, es kann keine Energie gewonnen werden.



53. Anwendung des zweiarmigen Hebels.



54. Anwendung des einarmigen Hebels.

Der Hebel findet noch jetzt in seinen einfachsten Formen, gerade wegen seiner Einfachheit, Billigkeit und leichten Handhabung, die weiteste Verwendung. Jede Schere stellt einen zweiarmigen, der Nußknacker eine Verbindung zweier einarmiger Hebel dar. Der Betrieb der Schleifräder, mit denen der Scherenschleifer unter dem bekannten Rufe durch die Straßen der kleineren Städte zieht, erfolgt durch den Fuß mittels eines einarmigen Hebels. Abb. 55 stellt eine Hebelade, auch Waldteufel genannt, zum Ausreißen von Bäumen mit ihren Wurzeln dar, mit welcher eine ganz bedeutende Kraft entwickelt werden kann. k c b ist ein eiserner Hebel, dessen Drehpunkt c irgendwie befestigt ist, z. B. mittels einer starken Kette an einen Baumstumpf dicht über der Erde. An dem auszureißenden Baume ist möglichst hoch eine Zugstange befestigt, doch nicht so, daß der Ast zu schwach ist und vielleicht allein abreißt. Der Hebel wird nun abwechselnd als zweiarmiger und einarmiger angewendet; an der Zugstange ist eine Kette befestigt, und in ein Glied der letzteren greift der Haken b am Ende des Hebels. Am anderen Ende k ziehen die Arbeiter in der gezeichneten Lage nach links soweit wie möglich, dann wird der

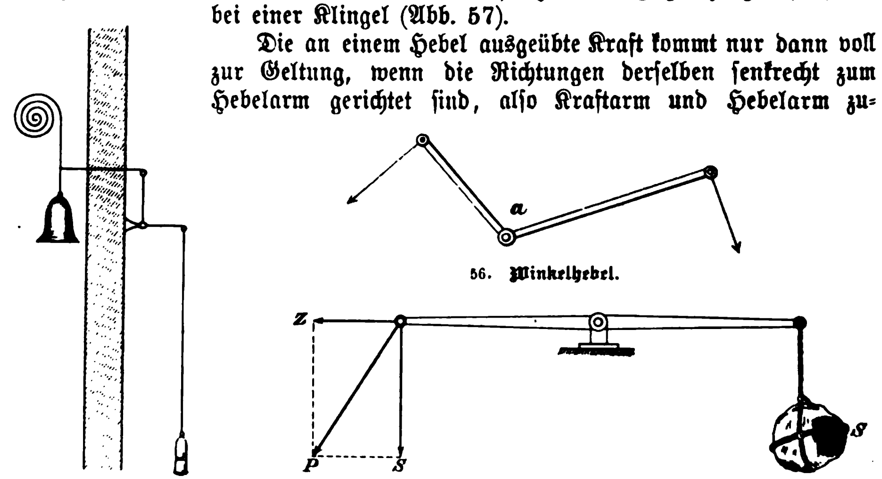
Haken a in ein Glied der Zugkette eingehakt, der Haken b gelöst und der Hebel nach rechts gezogen. Alsdann kann der Haken b weiter nach vorn in ein anderes Kettenglied eingehakt werden, worauf der Hebel wieder nach links gedreht wird; Haken a wird dann wieder gelöst und in ein anderes Kettenglied weiter vor eingesetzt. So wird langsam Glied für Glied der Kette nach der Baum herübergezogen. Zu der Wirkung des Arbeitshebels kommt nun noch die Hebelwirkung am Baum selbst, denn dieser stellt wieder einen zweiarmigen Hebel vor; am Arme mn wirkt die Kraft, während die Wurzeln den Lastarm darstellen, an dem als Widerstand die Festigkeit des Erdreichs entgegenwirkt, aus welchem die Wurzeln herausgerissen werden sollen. — Eine große Zahl anderer, im täglichen Leben vorkommender Werkzeuge und Geräte sind einfache Hebel, oder auf solche zurückzuführen: so die Schiebkarre, die Kneifzange, das Ruder, die Brotschneidemaschine u. a.

Bei den bisherigen Betrachtungen haben wir nur geradlinige Hebel angenommen, bei denen der ganze Hebel, also die Verbindungslinie der Kraftangriffspunkte und des Drehpunktes eine gerade Linie bilden. Die Ausführungen, speziell die Gesetze gelten aber auch für **Winkelhebel** (Abb. 56); dieselben werden da angewendet, wo die Richtungen der Kraft und Last sehr verschieden sind, wenn z. B. die Last vertikal wirken, aber einen horizontalen Zug erzeugen soll, wie bei einer Klingel (Abb. 57).



55. Hebelade (Waldteufel).

Die an einem Hebel ausgeübte Kraft kommt nur dann voll zur Geltung, wenn die Richtungen derselben senkrecht zum Hebelarm gerichtet sind, also Kraftarm und Hebelarm zusammenfallen. Dies geht aus dem Hebelgesetz und der Abb. 52 hervor. Denn wenn P senkrecht an dem Hebelarm wirkte, dann käme das Produkt P.OA statt P.OA' zur Geltung; da aber der senkrechte Kraftarm OA' kleiner ist als der Hebelarm OA, so wird durch die schräge Richtung der Kraft die Leistung verringert. Die Kraft P wird nämlich nach dem Parallelogramm der Kräfte zerlegt (Abb. 58) in eine Komponente S, die

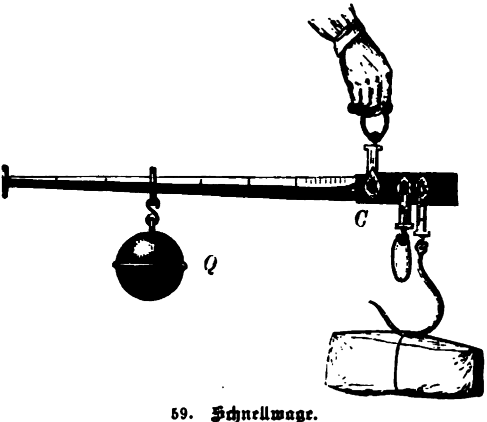


56. Winkelhebel.

57. Anwendung des Winkelhebels als Klingel.

58. Hebel mit schief wirkender Kraft.

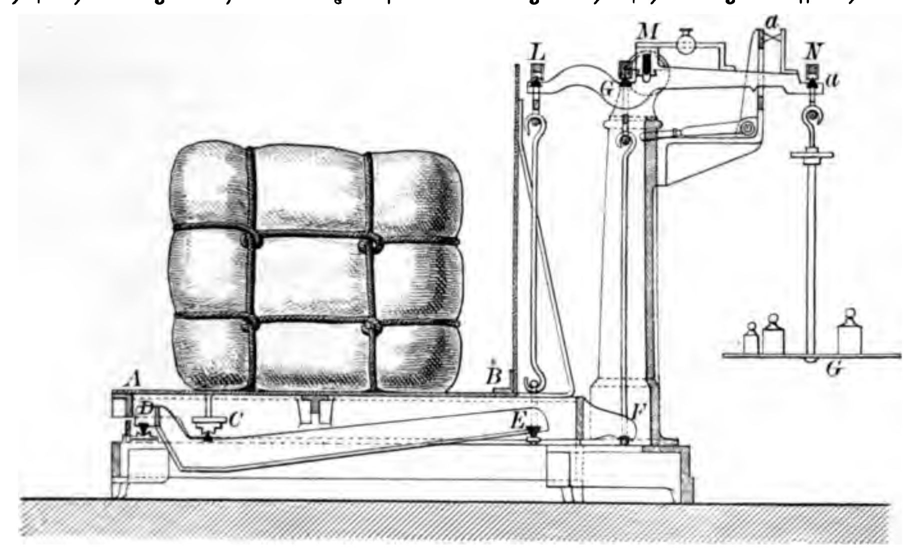
senkrecht am Hebelarm wirkt und zur Wirkung kommt, und eine Komponente Z in der Richtung des Hebelarmes, welche also ohne Nutzwirkung nur einen Zug oder Druck auf den Hebel ausübt, der von dem Drehpunkt aufgenommen wird.



59. Schnellwage.

Mit den gewöhnlichen einfachen Hebeln kann man große Drucke erzeugen, schwere Lasten heben, aber immer nur für kurze Entfernungen; um kontinuierliche Bewegungen zu erzeugen, dienen die im folgenden Kapitel besprochenen, ebenfalls auf den Hebelgesetzen beruhenden anderen sogenannten einfachen Maschinen Rolle und Wellrad und ihre verschiedenen Anwendungsformen.

Zu den wichtigsten Anwendungen des Hebelgesetzes gehören die Wagen. Ausführlicheres über Wägen und Gewichtssysteme findet sich im II. Teil beim Kapitel „Messen und Wägen"; auch sind dort die genauen chemischen und wissenschaftlichen Wagen behandelt. Hier seien nur einige technische Wagen besprochen.



60. Konstruktion der Dezimalwage.

Den wachsenden Verkehrs- und Handelsverhältnissen genügten schon seit langer Zeit die gewöhnlichen Wagen nicht mehr; einigermaßen schwere Gegenstände zu wiegen, machte bei denselben viele Schwierigkeiten. Wir finden jetzt noch in alten Kaufhäusern, in besonderen Hallen am Markte oder auch im Rathause kleinerer Städte mächtige Wagen aus einem schweren zweiarmigen, am Gewölbe aufgehangenen Wagebalken, an dem mittels starker Seile oder Ketten große Wageschalen aufgehängt waren. Mit diesen konnten noch Kaufmannsgüter von einigen Zentnern Gewicht, kleineres Schlachtvieh, bei besonders großen Dimensionen vielleicht auch Großvieh gewogen werden. Aber welche Arbeit machte dies! Es muß bei gleicharmigen Wagen, als welche diese schwerfälligen alten Einrichtungen meist ausgeführt sind, auf die eine Wagschale das volle Gewicht des zu wägenden Gegenstandes aufgesetzt werden. Für schwere Gegenstände nach unseren heutigen Begriffen, größere Maschinenteile, beladene Wagen oder gar Eisenbahnwaggons, mußten daher andere Wägeapparate konstruiert werden, wobei in erster Linie der Gesichtspunkt

maßgebend war, schwere Gegenstände mittels bedeutend geringerer Gewichte zu wägen. Hierzu bieten die Hebelgesetze die direkte Unterlage; man braucht eben nur den Arm der Wage für die Last entsprechend kleiner zu machen als den Arm, welcher die Gewichte trägt: um z. B. mit Gewichten bis zu 5 kg 100 kg wägen zu können, muß der Arm, welcher die Last trägt, 20mal kleiner sein, als der andere. Hierauf beruhen die Schnellwagen (Abb. 59); mit einem einzigen Gewichte Q kann man sehr verschiedene Lasten wägen, je nachdem man den Hebelarm bis zum Drehpunkt C vergrößert oder verkleinert. Auch der Lastarm kann verändert werden, indem häufig, wie in der Abbildung, zwei Aufhängepunkte für die Last vorhanden sind, deren Entfernungen vom Drehpunkte ein einfaches Verhältnis bilden, z. B. 2 : 3. Würde bei diesem Verhältnis die Last in der Abbildung an den anderen Haken gehängt, so müßte, damit Gleichgewicht hergestellt wird, das Gewicht Q um $^1/_3$ nach rechts geschoben werden. Mit solchen Schnellwagen ist ein genaues Wägen nicht möglich; sie bieten aber die Bequemlichkeit, daß sie leicht überall mit hingenommen werden können und daß man eben nur ein Gewicht braucht. Sie werden deshalb besonders noch auf Märkten und von Hausierern auf dem Lande gebraucht.

Bei den Dezimal- und Zentesimalwagen dagegen ist das Hebelverhältnis des Lastarmes zum Kraftarm konstant; bei ersteren ist dasselbe 1 : 10, bei letzteren 1 : 100. Um mit einer Zentesimalwage einen beladenen, etwa 60 Zentner schweren Kohlenwagen zu wägen, braucht man nur Gewichte bis zu etwa 60 Pfund. Solche Wagen für große Gewichte müssen auch noch anderen Bedingungen entsprechen; abgesehen von der als selbstverständlich zu betrachtenden Genauigkeit müssen sie ein bequemes Aufsetzen und Wiederabnehmen der zu wiegenden Gegenstände gestatten und bei aller Genauigkeit kräftig konstruiert sein. Die seit langer Zeit allgemein angewandte gewöhnliche Dezimalwage ist bekannt; die Abb. 60 zeigt ihre Wirkungsweise und Konstruktion. Letztere muß so beschaffen sein, daß die Wage richtig und gut funktioniert, gleichviel, wo auf der Plattform die Last aufgelegt wird, ob in der Mitte oder an einer Seite, da es nicht möglich ist, die Gegenstände gerade so zu stellen, daß ihr Schwerpunkt auf der Mitte liegt. Die Hauptteile sind: der Wagebalken LMN mit dem Drehpunkt M; bei N hängt an einer Schneide a die Gewichtsschale G. Die Last Q liegt auf der Plattform AB, der Druck der letzteren verteilt sich auf zwei Stellen; an der einen Seite drückt sie mit der Schneide C auf den Hebel DCE, welcher sich auf die feste Schneide D aufstützt, also einen einarmigen Hebel bildet und durch die Zugstange EL bei L am Wagebalken hängt, und auf der anderen Seite wird direkt ein Teil des Druckes auf die Zugstange FG übertragen, welche bei G mit einer Schneide am Wagebalken hängt. Die gesamte Last hängt also in verschiedenem, unbestimmtem Verhältnis an den beiden Schneiden L und G des Hebellastarmes; die Wirkung bleibt dieselbe, ob der Hauptteil der Last am Punkte L oder G wirkt. Dies ist darin begründet, daß das Verhältnis der Hebellängen DC : DE und GM : LM genau dasselbe ist. Ist dieses Verhältnis z. B. wie in der Abbildung 1 : 6, so greift der Druck bei C mit $^1/_6$ seiner Stärke am Wagebalken bei L an, der Druck

61. Brückenwage mit Eisenrahmen und Blechgehäuse; Querschnitt.

bei B mit voller Kraft bei G. Da aber der Hebelarm ML 6mal größer ist als MG, so wird die Wirkung wieder 6mal vergrößert, ist also direkt der Last proportional. Die Gesamtwirkung ist also dieselbe, als wenn die ganze Last bei G hinge, und für die Berechnung der Länge des Hebelarmes MN für die Gewichte braucht nur die Länge MG in Betracht gezogen zu werden. Das Verhältnis beider Längen ist 1 : 10, so daß das bei P aufgelegte Gewicht $^1/_{10}$ der zu wiegenden Last beträgt; daher der Name Dezimalwage. Bei a befinden sich zwei Spitzen, die beim richtigen Einspielen der Wage, also bei genau hergestelltem Gleichgewicht, einander gerade gegenüberstehen. Durch einen beweglichen Griff kann der Wagebalken, wenn die Wage nicht benutzt wird, etwas gehoben und festgestellt werden, so daß die Schneide bei der Aufhängung M nicht mehr aufliegt und so geschont wird. Außer der Schale für die Auflegung der Gewichte hat die Wage noch ein Laufgewicht; mit den Gewichten der Wagschale wird das Gleichgewicht nur roh eingestellt, z. B. bis auf 5 kg, während die genaue Einstellung mit dem Laufgewicht geschieht. Die Vorrichtung ist ähnlich wie eine Schnellwage, doch viel genauer: auf einer Stange ist ein kleines verschiebbares Gewicht, das so verschoben wird, daß die Spitzen der Wage genau einspielen; eine auf der Stange eingravierte Skala zeigt dann genau, wieviel den aufgesetzten Gewichten noch zuzurechnen ist.

Solche Brückenwagen für den gewöhnlichen Geschäftsgebrauch sind im allgemeinen nicht für sehr genaue Messungen eingerichtet, und es werden auch für gewöhnlich keine weitgehenden Ansprüche an ihre Genauigkeit gestellt. Da man ohne Laufgewicht doch kein kleineres Gewicht als 1 g verwendet, so ist man auf eine Meßgenauigkeit von 10 g beschränkt. Meist genügt aber im praktischen Leben beim Wägen mit Dezimalwagen eine weit geringere Genauigkeit; bei Benutzung von 10 g als kleinstem Gewichte ohne Anwendung des Laufgewichtes kann z. B. der Fehler beim Wägen $^1/_{10}$ kg betragen, oder bei 100 kg Gewicht $^1/_{1000}$. Aber besonders gut konstruierte Apparate dieser Art können eine sehr weitgehende Genauigkeit haben und selbst zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet werden; man kann mit solchen bei Belastungen bis zu 300 kg noch Teile eines Grammes wiegen und beispielsweise den Gewichtsverlust durch Verdunstung von Wasser, sogar durch Wasserausscheidung der Pflanzen nachweisen.

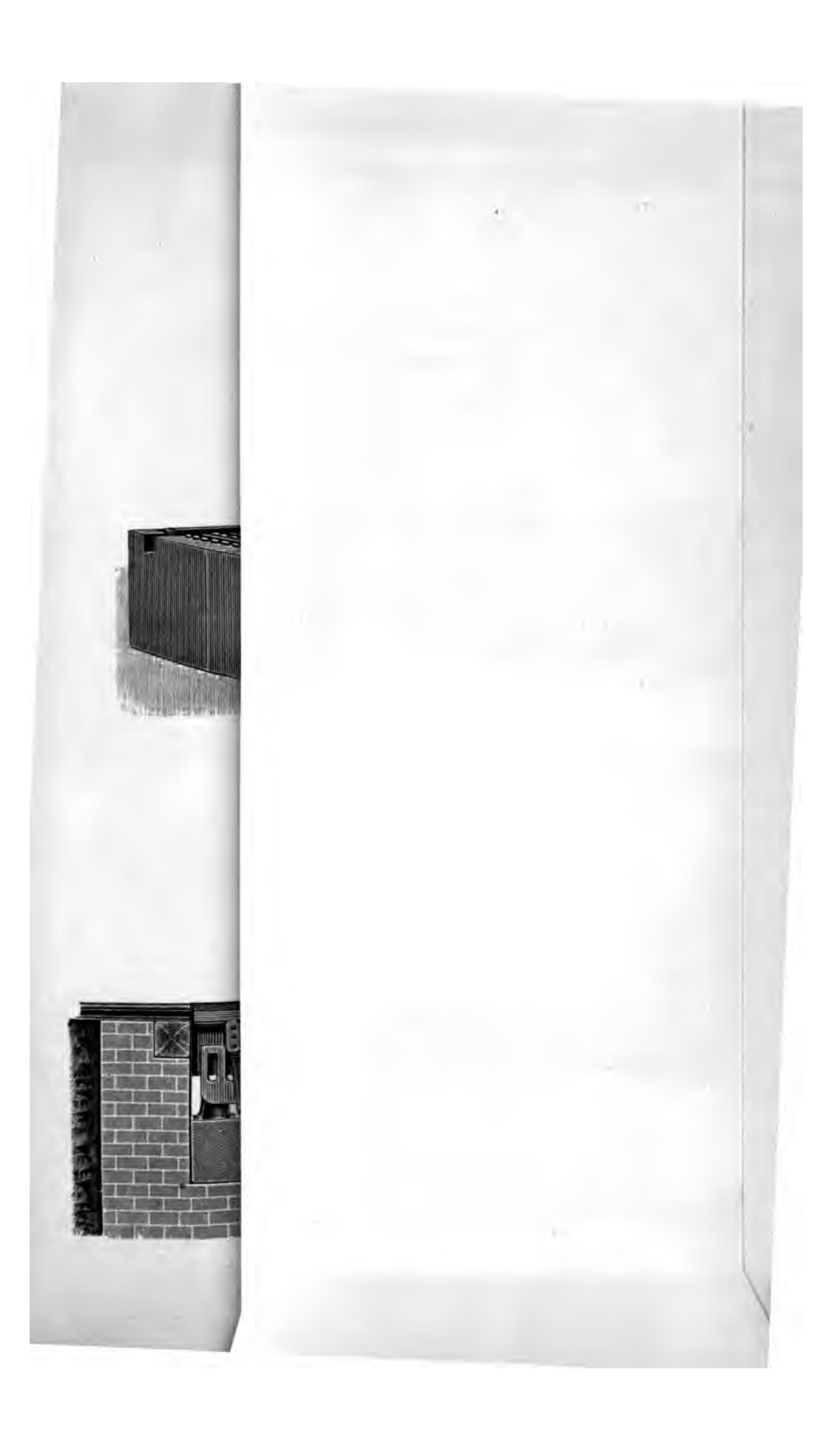
In der Abb. 61 sowie der beigefügten Tafel ist noch eine Brückenwage der größten Art von Carl Schenk in Darmstadt dargestellt, wie sie ähnlich auf den Bahnhöfen, in großen Fabriketablissements, sowie in den meisten Städten als städtische öffentliche Wagen zum Wägen von Kohlen und anderen Materialien jetzt allgemein in Anwendung sind. Das Fuhrwerk oder der Eisenbahnwaggon fährt auf die Plattform, welche entweder ein Stück Schienengeleise ebenso wie die Strecke trägt (bei Benutzung nur für Eisenbahnwagen), oder in welchen die Schienen eingelassen sind, so daß die Plattform mit der Oberkante der Schienen in derselben Höhe liegt; für den Radkranz der Waggons sind dann zwei schmale Schlitze gelassen. Diese Anordnung hat den Zweck, daß die Wage auch für Fuhrwerk benutzt werden kann. Die beiden Schienen ruhen auf starken Längsträgern, welche durch mehrere Querträger steif verbunden sind und die Last aufnehmen; sie übertragen den Druck auf zwei Paar einarmige Hebel, s. Tafel, nahe an deren Unterstützungspunkt. Jedes Paar ist dreiecksartig miteinander verbunden; an dem Ende, wo die Last aufruht, haben beide eine gemeinschaftliche Hinterachse, während sie sich am anderen Ende, gegen die Mitte der Wage hin, in je einen Arm vereinigen. Diese beiden Hebelarme wirken wieder auf einen in der Mitte, quer zur Längsrichtung liegenden Querhebel, den Kommunikator (Abb. 61), ebenfalls nahe am Unterstützungspunkt, also mit kleinem Kraftarm, und das Ende dieses Hebels schließlich ist durch Zugstange mit der eigentlichen Wägevorrichtung verbunden. Der Druck des Wagengewichts ist also bis hierhin durch die zweimalige Hebelübertragung bedeutend geringer geworden. Die Wägung geschieht bei diesen großen Wagen fast ausschließlich mit Laufgewichten. Die Zugstange des unteren Lasthebels greift wieder an dem kurzen Arm des zweiarmigen Gewichtshebels an; der lange Arm trägt ein verschiebbares Hauptlaufgewicht. Durch dieses wird aber die Wage nur roh eingestellt; die genaue Einstellung des Gleichgewichtes geschieht durch ein zweites, bedeutend kleineres Laufgewicht, welches an einer besonderen Skala geschoben

wird, die über dem Haupthebelarm sitzt (s. Tafel). Meist zeigen die einzelnen Teilstriche der Hauptskala je 100 kg an, während die kleinere die einzelnen Kilogramm markiert. Die ganze über Boden befindliche Wägevorrichtung ist in der Zeichnung mit einem dichten Blechgehäuse umschlossen, an welchem beim Gebrauch eine Klappe geöffnet wird. Meist befindet sich aber das Werk in einem dicht neben der Plattform errichteten kleinen Wägehäuschen, in dem sich der Wiegemeister aufhält. In der Abb. 61 ist noch unten rechts von dem Wägeapparat eine Signalvorrichtung angebracht; bei der horizontalen Stellung der Signalscheibe darf kein Fuhrwerk auf die Wage fahren, erst wenn der Wiegemeister den Entlastungsmechanismus der Wage eingestellt hat, geht gleichzeitig die Signalscheibe in die Höhe und zeigt freie Auffahrt an.

Die Wagen der beschriebenen Konstruktion werden für Lasten von 20000—60000 kg ausgeführt. Der Genauigkeitsgrad derselben ist nach den Zwecken, denen sie dienen, verschieden; bei besonders sorgfältiger Ausführung erreicht die Genauigkeit 1 : 15000, d. h. bei einem gewöhnlichen beladenen Eisenbahnwaggon können noch einzelne kg gewogen werden.

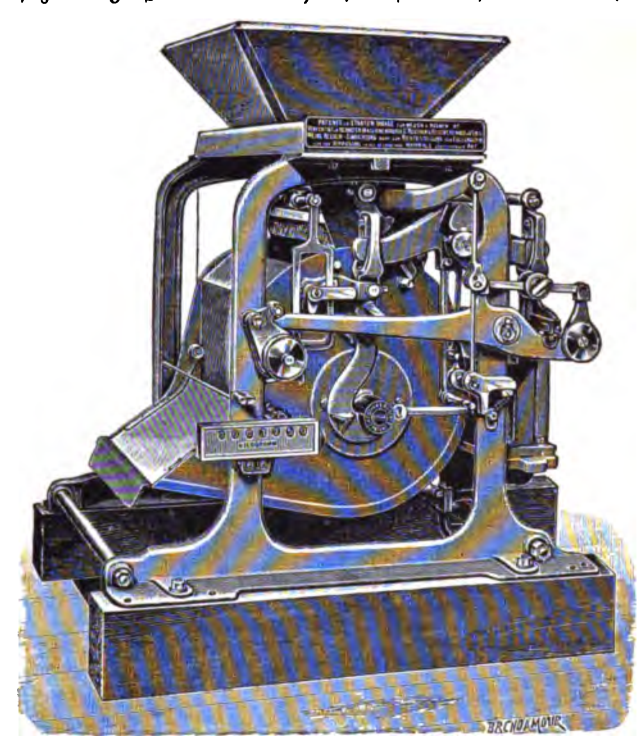
Vielfach werden neuerdings die Wagen mit selbstthätigen Registriervorrichtungen versehen. Diese Apparate drücken das durch die Einstellung der Laufgewichte ermittelte Gewicht selbstthätig auf Billets, welche Einteilung nach Zehntausenden, Tausenden, Hunderten, Zehnern und einzelnen Kilos haben; in jede Rubrik wird eine Zahl gedruckt. Unrichtige Gewichtsangaben durch ein Irren des Wägers bei der Ablesung der Skala sind also hierdurch ausgeschlossen; der Apparat gibt unfehlbar sicher das ermittelte Gewicht an, und die gedruckten Billets können direkt als Originalwiegeschein dienen.

Man versieht auch zu manchen Zwecken, wo schnell gewogen werden soll, es dagegen auf große Genauigkeit weniger ankommt, z. B. für das Wägen des Passagiergepäcks auf den Eisenbahnen, die Wagen mit einer kombinierten Laufgewichts- und Zeigervorrichtung; mit dem Laufgewicht wird das Gewicht durch einen Griff roh eingestellt, auf 0, 50, 100 kg u. s. w., dann gibt der Zeiger das darüber hinausgehende Gewicht in einzelnen Kilogramm an. In Betrieben, wo täglich eine große Anzahl von kleineren Wagen von annähernd gleichem Gewichte auf Fabrikgeleisen verwogen werden müssen, wie z. B. die Förderwagen bei Kohlenzechen, Erzbergwerken, Kokereien, Zementfabriken, Hochofenanlagen, finden selbstwiegende und selbstregistrierende Brückenwagen Anwendung. Die Konstruktion des Hebelsystems derselben ist ähnlich wie bei der beschriebenen Waggonwage. Das Gewicht der einzelnen, auf dem Fabrikgeleise über die Wage laufenden Rollwagen (Kohlenwagen, Lowries, Hunde oder dergl.) muß innerhalb gewisser Grenzen liegen, die Differenz darf z. B. 150 kg nicht übersteigen. Dies kommt auch bei regelmäßigem Betriebe nicht vor; die leeren Wagen sind ziemlich genau gleich schwer, und bei richtiger Füllung kann das Gewicht nur wenig differieren. Das Gewicht der leeren Wagen wird zunächst von vornherein ausgewogen („tariert"); ist das Minimalgewicht der Ladungen nun z. B. 600 kg, das Maximalgewicht 700 kg, so wird auf eine Wagschale des Wägeapparates (oben rechts in der Zeichnung) das 600 kg entsprechende Gewicht aufgelegt, also bei 100facher Übertragung 6 kg, und die Hundertziffer des Registrierapparates ein- für allemal auf 6 gestellt. Bei jeder einzelnen Wägung werden nun die Zwischenzahlen der Gewichte, z. B. 635, 664 auf einzelne Billets gedruckt, welche sich in einem Kästchen sammeln. Das Einstellen des Minimalgewichtes und das Einlegen und Herausnehmen der Billets ist also die einzige Bedienung, die der Apparat braucht. An jedem Abend, oder beim Schichtwechsel kann durch Addition festgestellt werden, wie viel das Gesamtgewicht der aus- oder eingegangenen Kohlen, Erze u. s. w. beträgt. Die Wage kann noch mit einem sehr praktischen Kontrollapparat ausgestattet werden. Der Querhebel steht nochmals mit einem Gewichtshebel in Verbindung, der der zulässigen Minimalbelastung das Gleichgewicht hält. Kommt eine Wagenladung mit einem geringeren Gewichte als das vorgeschriebene Minimalgewicht ist, auf welches dieser Hebel eingestellt ist, so bietet dieser ein Übergewicht, und der Wagen wird gar nicht zur Wägung zugelassen. Das Geleise ist nämlich für gewöhnlich durch einen Riegel gesperrt, der selbstthätig erst dann zurückspringt und die Fahrt freigibt, wenn ein größeres als das Minimalgewicht auffährt. Nach der



Auffahrt springt hinter dem Wagen der Riegel sofort wieder vor; auf diese Weise wird also auch ein Zurückfahren und betrügerisches Doppeltwiegen unmöglich gemacht. So wird nun ohne jegliche Aufsicht eine einfache und vollständig sichere, unbestechbare Kontrolle über die geförderten oder verbrauchten Mengen des betreffenden Materials bewirkt. An Stelle des Registrierapparates, der die einzelnen Ladungen aufschreibt, wird auch vielfach ein selbstthätiger Additionsapparat verwendet, welcher alle Wägungen fortlaufend zählt und summiert, so daß jederzeit das verwogene Gesamtgewicht abgelesen werden kann. Dieser Apparat findet vorteilhaft da Anwendung, wo man nicht das Gewicht der einzelnen Ladungen kennen will, sondern das Gesamtgewicht der Förderung oder eines Materialverbrauches in einer bestimmten Zeit, z. B. für die Kontrolle des täglichen Kohlenverbrauches eines Hochofens oder einer größeren Dampfkesselanlage.

Für manche Großbetriebe, z. B. große Getreidemühlen, Ölfabriken, Brauereien, Silospeicher, ist ein schnelles und genaues Verwiegen großer Mengen Getreide von größter Wichtigkeit. Besonders bei großen, modern eingerichteten Mühlen und Getreidespeicheranlagen geschieht der Transport des Getreides nur noch auf maschinell-automatischem Wege. Aus dem Schiffe wird z. B. der überseeische Weizen durch Elevatoren in die Höhe gehoben, oben in große Trichter geschüttet und durch Rinnen auf breite, laufende Transportbänder geführt u. s. w. Auf diesem Wege muß an einer Stelle eine Wägung stattfinden, welche den Fortgang des Betriebes nicht stören darf. Die gewöhnliche Wägungsmethode mittels Dezimalwagen oder Brückenwagen ist hier völlig unzureichend. Für solche Zwecke werden **automatische Wagen** verwendet, welche fortlaufend, ohne jede Aufsicht das Getreide oder auch sonstige Materialien während des Transportes wägen. Die Erfindung und Einführung dieser sinnreichen und praktischen Apparate ist hauptsächlich der Firma **C. Reuther & Reisert**, Hennefer Maschinenfabrik zu Hennef, zuzuschreiben; sie sind in der That bei Betrieben der genannten Art fast unentbehrlich geworden. Abb. 62 stellt die automatische Getreidewage **Chronos** der genannten Firma dar. Das Getreide läuft ununterbrochen mit Rinne und Transportband in den über der Wage befindlichen Trichter und aus diesem in die darunter befindliche, um eine horizontale Achse drehbare Trommel; diese hängt in zwei Schneiden an dem einen Arm eines zweiarmigen Hebels, während der andere das Gewicht trägt. Zwischen Trichter und Trommel befindet sich der Einlaufmechanismus, der zwei Einlaufklappen hat; die eine sperrt kurz vorher, ehe die richtige Getreidemenge eingelaufen ist, den Zulauf zum Teil ab, die andere schließt ihn ganz in dem Moment, wo die Wage im Gleichgewicht ist. In demselben Augenblicke wird eine Arretierung ausgelöst, welche die auf zwei Schneiden drehbar gelagerte Trommel bis dahin festhielt, worauf dieselbe umkippt und ihren Inhalt



62. Automatische Getreidewage.

nach unten entleert; dabei öffnet sich die links sichtbare Klappe, die sonst durch eine sich vorlegende Stange geschlossen gehalten wird. Nach völliger Entleerung dreht sie sich wieder zurück, die Einlaufklappen öffnen sich wieder und die Arretierung legt die Trommel wieder fest. Diese Vorgänge folgen mit größter Sicherheit selbstthätig nacheinander; die geringe, für die Bewegungen erforderliche Kraft wird von dem Gewichte des Getreides selbst geliefert, indem die Massenverteilung der Trommel so gewählt ist, daß sie gefüllt nach unten kippt, dagegen leer wieder das Übergewicht nach der anderen Stellung bekommt. Die Wage arbeitet sehr schnell, denn das Getreide fällt schnell in die Trommel; nur zum Schluß einer jeden Füllung läuft es nur noch ganz langsam nach zum genauen Auswägen. Die Wage richtet sich in ihrer Thätigkeit sowohl nach der Zufuhr des zu wiegenden wie der Abführung des gewogenen Getreides; wenn der Abfluß gehindert ist, entleert sich die umgekippte Trommel langsamer, oder sie bleibt, wenn das Getreide sich angestaut hat, stehen, der Betrieb wird also unterbrochen. Die automatische Wage Chronos ist, wie die früher besprochenen Brückenwagen, mit selbstthätiger Registriervorrichtung versehen und arbeitet so vollständig sicher und genau, daß sie als eichfähig erklärt worden ist. Die Leistungsfähigkeit beträgt für die größten Nummern stündlich bis zu 150 000 kg Weizen oder Roggen, es kann also mit einer Wage täglich (in 10 Stunden) der Inhalt von 150 Doppelwaggons verwogen werden!

Der unaufhörlich steigende Verkehr, das Anwachsen der Großindustrie stellen immer neue, größere Ansprüche an die Technik und die Erfindungskraft; aber wenn sich irgendwo ein wirkliches Bedürfnis geltend macht, so gelingt es auch meist bald, in geeigneter Weise Abhilfemittel zu schaffen. Solche Einrichtungen, wie Brückenwagen, welche Lasten von 100 000 kg auf einmal wiegen, automatische Wagen, mit denen man ohne Menschenarbeit mitten im Betriebe täglich mehrere Eisenbahnzüge Getreide verwiegen kann, kannte man vor einigen Jahrzehnten nicht und hätte sie mit den damaligen Hilfsmitteln der Technik vielleicht auch nicht in der Vollkommenheit herstellen können; die Hauptsache aber war jedenfalls: das Bedürfnis war nicht in dem Maße vorhanden wie jetzt.

Die einfachen Maschinen. Hebezeuge.

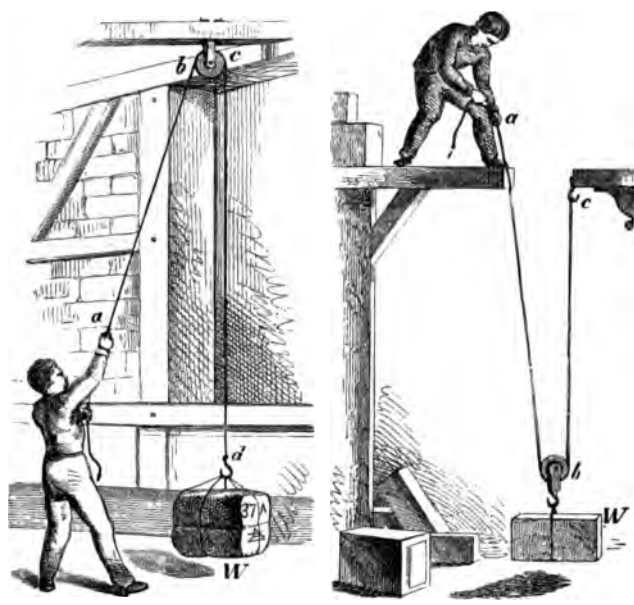
Feste und lose Rolle. Flaschenzug. Differentialflaschenzug. Wellrad. Haspel. Winde. Räderübertragung. Transmission. Tretrad. Schiefe Ebene. Schraube. Die Schiffsschraube. Schraubendampfer. Kräne.

Die Technik der Hebezeuge spielt im Bauwesen wie im Maschinenbau und der ganzen Großindustrie eine wichtige Rolle. Bei jedem größeren Bau werden Aufzugvorrichtungen verschiedener Art angewendet, von der Rolle und dem Flaschenzug bis zu der am Boden und auf den Gerüsten auf Schienengeleisen fahrenden Dampfwinde. Es liegt auf der Hand, daß in rein mechanischer Hinsicht das Hinaufschaffen von Materialien auf die Höhe des Baugerüstes durch irgend welche Aufzugsvorrichtung rationeller sein muß, als das Hinauftragen durch Arbeiter, denn letztere müssen stets ihr eigenes Gewicht als tote Last mit in die Höhe tragen, welches größer ist, als das Gewicht der Nutzlast, der Steine oder sonstigen Baumaterialien, wohingegen bei der Verwendung von Hebezeugen der Arbeiter unten bleibt und nur die Arbeit zum Heben der Materialien selbst ohne oder mit geringer toter Last der Körbe oder Kasten zu leisten hat. Bei sehr großen Bauwerken wird es schließlich noch rationeller, die teuere mechanische Menschenarbeit durch Dampfarbeit zu ersetzen.

Betrachten wir zunächst die einfachsten Formen der Vorrichtungen zur Umänderung mechanischer Arbeit, die sogenannten *einfachen Maschinen*, welche als Anwendungen des Hebels zu betrachten sind und auf den Hebelgesetzen beruhen. Unter der Bezeichnung „einfache Maschinen" faßt man eine Anzahl einfacher Vorrichtungen zusammen, welche insofern „Maschinen" genannt werden können, als durch sie bezweckt und bewirkt wird, in der Natur vorkommende Verhältnisse und Kräfte in vorteilhafter Weise für die praktische Anwendung umzuändern, und welche alle den Charakter der Einfachheit tragen, indem sie bezüglich ihrer Wirkungsweise nicht auf der vereinten Anwendung mehrerer ver-

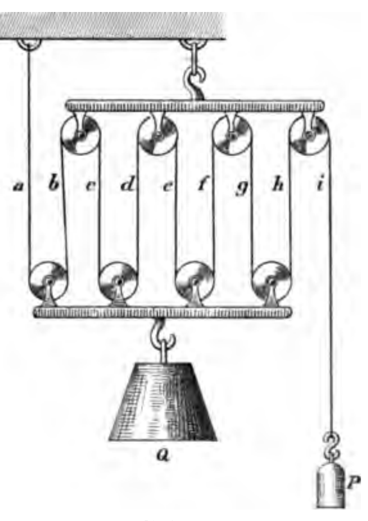
schiedener Prinzipien oder mechanischer Gesetze beruhen und bezüglich ihrer Konstruktion und Anordnung nur aus wenigen einfachen Elementen bestehen. Die Leistungen und Zwecke der einfachen Maschinen lassen sich unter folgende Gesichtspunkte ordnen: 1) Änderung einer Kraftrichtung (einfache Rolle); 2) Änderung des Angriffspunktes der Kraft; 3) Vergrößerung der Kraft auf Kosten der Schnelligkeit der Leistung oder des zurückgelegten Weges, oder umgekehrt Vergrößerung der Schnelligkeit oder des Weges bei Verringerung des Kraftaufwandes; 4) Vereinigung mehrerer dieser Wirkungen.

Die Rolle. Dieselbe dient in ihrer einfachsten Anwendung als feste Rolle nur dazu, einer ausgeübten Zugkraft eine andere Richtung zu geben; eine Vergrößerung der Kraft oder der Geschwindigkeit kann durch diese nicht bewirkt werden. Allgemein ist eine Rolle eine kreisrunde Scheibe, welche um einen zentralen Zapfen leicht drehbar ist und am Umfange eine Rille zur Aufnahme eines Seiles hat. Die **feste Rolle** ist an dem Zapfen fest aufgehängt (Abb. 63). An dem einen Seilende hängt bei d die Last W, am anderen wirkt bei a die Kraft des Arbeiters. Ebenso viel, wie die Last sich heben soll, muß der Arbeiter das andere Seilende niederziehen: Kraft- und Lastweg sind also gleich, ebenso Kraft und Last, oder erstere muß etwas größer sein, um die Aufwärtsbewegung zu bewirken und die Reibung des Rollenzapfens, sowie die des Seiles zu überwinden. Für die Leistung wäre es also dasselbe, wenn ein Arbeiter von oben her die Last direkt am Seile aufziehen würde; dies wäre aber viel unbequemer. Auf einem Baugerüst oder an der Öffnung eines Vorratsspeichers ist meist nicht so viel Platz und kein so sicherer Standpunkt, wie unten auf dem festen Boden; auch ist ein Ziehen von oben nach unten leichter, als umgekehrt, da das Gewicht des Menschen dabei mitwirkt.



63. Feste Rolle. 64. Lose Rolle.

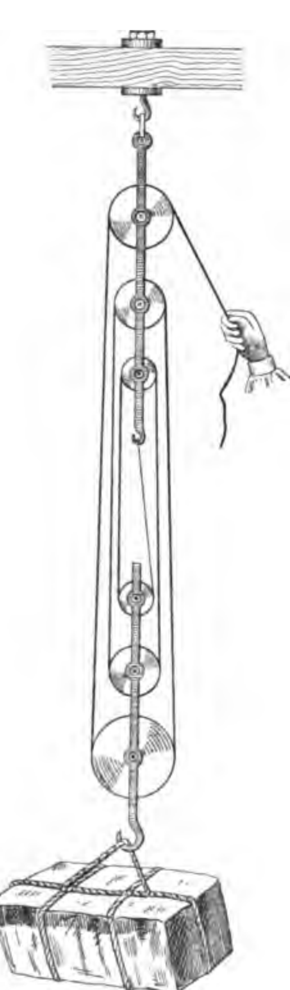
Wesentlich anders verhält es sich mit der **losen Rolle**, bei welcher die Last W am Haken der Rolle b hängt (Abb. 64). Das eine Seilende ist bei c befestigt, und am anderen zieht bei a oben der Arbeiter; beide Seilenden tragen die Hälfte der Last, der Arbeiter braucht also nur der halben Last das Gleichgewicht zu halten und dementsprechend nur die halbe Kraft aufzuwenden, als bei der festen Rolle, um die Last zu heben. Dagegen hat er doppelt so lange zu ziehen; denn um die Last bis nach oben zu heben, muß er beide Seilenden, ab + bc, zu sich heraufziehen. Er muß also mit der halben Kraft doppelt so lange arbeiten. Bei der festen Rolle ist es gleichgültig, welche Richtung das Seilende hat, an welchem die Kraft wirkt,



65. Rollenzug.

da für jedes Stück eingezogene Seillänge die senkrecht hängende Last um ein ebenso großes Stück gehoben wird. Bei der losen Rolle dagegen wird die einzuziehende Länge kleiner, wenn beide Seilenden nicht senkrecht hängen, sondern schräg; je stumpfer der Winkel wird, den beide bilden, desto kürzer dauert die Hebung, desto größer ist aber auch die erforderliche Kraft.

Wird nun das Seilende, an welchem in Abb. 64 der Arbeiter zieht, wieder über eine feste Rolle geschlungen, so daß ein Arbeiter von unten ziehen kann, so ändert sich hierdurch bezüglich Kraft und Zeit nichts. Wir haben die einfachste Anwendung eines Rollenzuges, wie allgemein die Kombinierung fester und loser Rollen genannt wird. Solche Kombinationen gibt es in der verschiedensten Anordnung. Bei allen kommt es bezüglich des Verhältnisses der Kraft zur Last nur auf die Anzahl der losen Rollen und ihre Anordnung an; die festen Rollen haben darauf keinen Einfluß und dienen stets nur dazu, die Kraftrichtung umzukehren. Durch jede lose Rolle aber wird die erforderliche Kraft reduziert und zwar in verschiedenem Grade nach den zwei im Prinzip verschiedenen Anordnungen. Bei dem Rollenzug (Abb. 65) tragen offenbar die acht Seilenden a b c d e f g h je $^1/_8$ der Last Q; in jedem, also auch in dem Ende i, herrscht die Spannung $^1/_8$ Q, so daß die Kraft P im Gleichgewicht $^1/_8$ der Last Q beträgt. Die letzte feste Rolle hat keine Bedeutung mehr; ebenso gut könnte die Kraft direkt an h nach oben wirken. Um die Last um ein bestimmtes Maß zu heben, müssen alle acht Seilenden um ebenso viel verkürzt werden, das Seilende h oder i muß also um die achtfache Länge angezogen werden. Stets kehrt also, auch bei den weiterhin beschriebenen Konstruktionen dieses Grundgesetz wieder: Kraft $\times$ Kraftweg = Last $\times$ Lastweg.

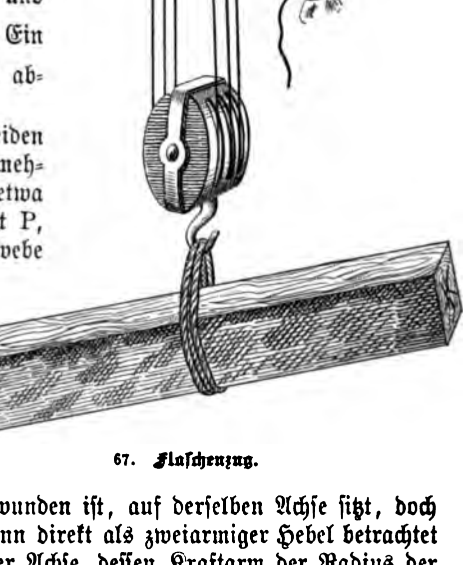

66. Flaschenzug.

Der Flaschenzug. Eine praktisch wichtigere Verbindung von Rollen zu einer Zugvorrichtung ist der **Flaschenzug**, bei welchem mehrere Rollen in je zwei Gehäusen (Flaschen) übereinander oder nebeneinander drehbar befestigt sind. Eines der Gehäuse ist fest aufgehängt, das andere ist lose und trägt die Last (Abb. 66 u. 67); hier sind je drei Rollen im festen und im losen Gehäuse. Zum Heben der Last müssen, wie leicht ersichtlich, in beiden Fällen alle sechs Seilenden zwischen der festen und der losen Flasche, also die sechsfache Länge der Hubhöhe am Kraftseil aufgezogen werden; anderseits beträgt die Kraft nur $^1/_6$ der Last, da in allen Seilen nur $^1/_6$ der Lastspannung herrscht. Allgemein heißt die Regel bei diesen Anordnungen von Rollenzügen oder Flaschenzügen: Die Kraft ist gleich der Last, dividiert durch die doppelte Anzahl der losen Rollen (wobei die Rollen des losen Gehäuses als lose Rollen gelten). Durch eine Anordnung nach einem anderen Prinzip kann aber noch eine bedeutend größere Erhöhung der Kraftleistung erzielt werden: durch der Potenzflaschenzug (s. Abb. 68). In dem Seile, welches die unterste Rolle umschlingt, herrscht die Spannung $K_1 = {}^1/_2$ Q, in dem folgenden $K_2 = {}^1/_2 K_1 = {}^1/_4$ Q, in dem obersten und hiermit auch in dem Kraftseil $K_3 = {}^1/_2 K_2 = {}^1/_8$ Q; oder allgemein: die Kraft ist gleich der Last, dividiert durch die sovielte Potenz von 2, als lose Rollen vorhanden sind. Bei dieser Anordnung muß die oberste Rolle bedeutend höher aufgehängt werden, als zu welcher Höhe die Last gehoben werden soll; denn wenn die oberste lose Rolle bis zum höchsten Punkte, also zur festen Rolle gehoben ist, hat die zweite Rolle nur die halbe und die dritte nur $^1/_4$ der Höhe erreicht. Dies ist natürlich ein Übelstand, der die Vorrichtung z. B. für das Hoch-

ziehen von schweren Werkstücken für Neubauten auf die Höhe des obersten Gerüstes ungeeignet macht.

Sehr viel angewendet wird dagegen in neuerer Zeit der **Differentialflaschenzug**, welchen Abb. 69 schematisch in der Wirkungsweise darstellt. Derselbe besteht aus zwei, meist aus Eisen in einem Stück gegossenen festen Rollen von verschiedenem Durchmesser, mit gemeinschaftlicher Achse, und einer losen Rolle, an welcher die Last hängt. Die festen Rollen sind als Kettenräder ausgebildet, d. h. sie haben am Umfang Zähne, die sich in die Glieder der dazu passenden Kette einlegen, wodurch das Gleiten der Kette auf den Rollen verhindert wird (Seile werden hierbei nicht verwendet). Die Kette ist endlos und, wie aus der Abbildung ersichtlich, in eigentümlicher Weise um die drei Rollen geschlungen. Die Kraft P greift, wie angedeutet, an der losen Kettenschlinge an; die Kette läuft über die große feste Rolle, wodurch diese und gleichzeitig mit ihr die kleine Rolle in Drehung versetzt wird, so daß die Kette von letzterer sich abwickelt. Je nach der Differenz der Durchmesser D und d beider Räder wickelt sich also mehr Länge auf als ab, die Lastrolle wird gehoben, während die lose Kettenschleife in gleichem Maße sich verlängert. Ist z. B. das Verhältnis der Rollendurchmesser 6 : 4, so wird bei Aufziehen des Kettenendes a b um 1 m, das Ende d um $^2/_3$ m sinken; die Kettenschleife c d wird also um $^1/_3$ m gekürzt, oder die Lastrolle um $^1/_6$ gehoben. Also ist in diesem Falle die Kraft $^1/_6$ der Last. Die allgemeine Beziehung läßt sich nicht gut in einem einfachen Satze ausdrücken, sondern einfacher und klarer durch den Ausdruck $P = \frac{Q}{2}\left(1 - \frac{d}{D}\right)$. Ein Differentialflaschenzug ist an der weiter hinten abgebildeten Laufkatze (Abb. 91) sichtbar.

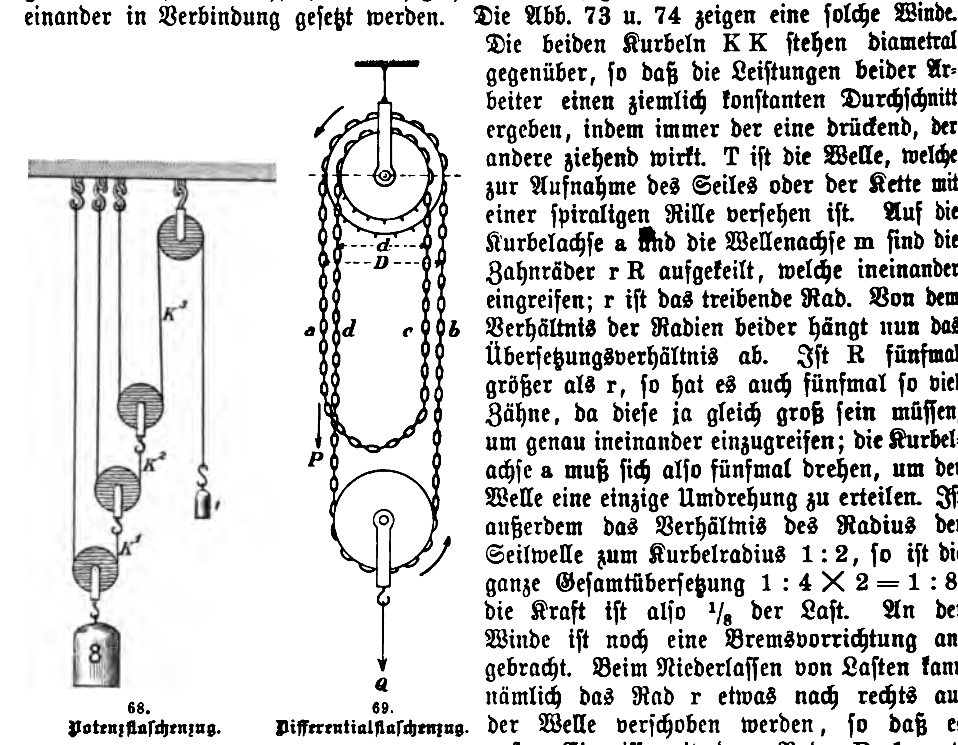
Je geringer also der Unterschied der beiden festen Rollen ist, desto stärker ist die Kraftvermehrung. Bei den üblichen Verhältnissen — meist etwa 11 : 12 — wird die Last, auch ohne die Kraft P, allein durch die Reibungswiderstände in der Schwebe gehalten.



67. Flaschenzug.

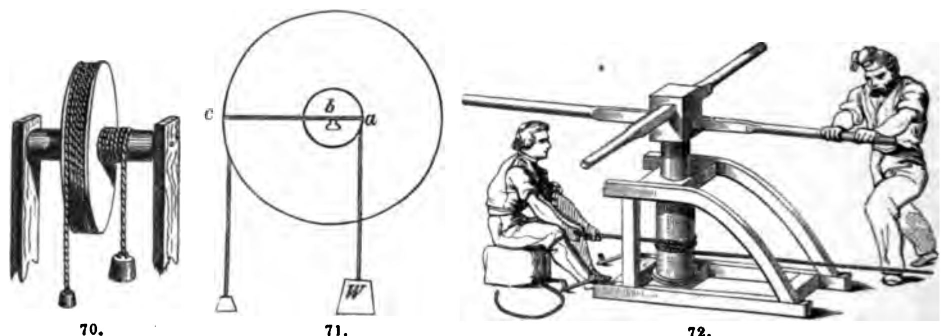
Wellrad. In der Wirkungsweise ähnlich wie der Differentialflaschenzug ist das Rad an der Welle oder **Wellrad** (Abb. 70 u. 71). Auch hier greift die Kraft an einem Seil (oder einer Kette) an einem Rade an, welches mit einer Rolle oder Welle von kleinerem Durchmesser, um die das Lastseil gewunden ist, auf derselben Achse sitzt, doch ist keine lose Rolle vorhanden. Das Wellrad kann direkt als zweiarmiger Hebel betrachtet werden, dessen Unterstützungspunkt die Mitte der Achse, dessen Kraftarm der Radius der Rolle bc und dessen Lastarm der Radius der Welle ba ist, da ja Kraft und Last am äußeren Umfange beider wirken. Also ist die Gleichgewichtsbedingung: Die Kraft verhält sich zur Last, wie der Radius der Welle zum Radius des Rades. In den meisten Fällen der Praxis ist das Rad durch eine andere, handlichere Vorrichtung ersetzt, z. B. beim **Haspel** durch mehrere Hebelarme, Abb. 72. Die ausgebreitetste Anwendung finden die **Winden**, die an Stelle des Rades 1 oder 2 Kurbeln haben. Um eine weitergehende Kraftvergrößerung zu erzielen, als durch das bloße Verhältnis des Kurbelradius zum Wellen-

radius, welches ja auf enge Grenzen begrenzt ist, um eine „größere Übersetzung" zu erhalten, läßt man vielfach die Kurbel nicht direkt auf die Seilwelle wirken, sondern man gibt beiden besondere Achsen, die durch Zahnräder, ein sogenanntes Rädervorgelege, miteinander in Verbindung gesetzt werden. Die Abb. 73 u. 74 zeigen eine solche Winde. Die beiden Kurbeln K K stehen diametral gegenüber, so daß die Leistungen beider Arbeiter einen ziemlich konstanten Durchschnitt ergeben, indem immer der eine drückend, der andere ziehend wirkt. T ist die Welle, welche zur Aufnahme des Seiles oder der Kette mit einer spiraligen Rille versehen ist. Auf die Kurbelachse a und die Wellenachse m sind die Zahnräder r R aufgekeilt, welche ineinander eingreifen; r ist das treibende Rad. Von dem Verhältnis der Radien beider hängt nun das Übersetzungsverhältnis ab. Ist R fünfmal größer als r, so hat es auch fünfmal so viel Zähne, da diese ja gleich groß sein müssen, um genau ineinander einzugreifen; die Kurbelachse a muß sich also fünfmal drehen, um der Welle eine einzige Umdrehung zu erteilen. Ist außerdem das Verhältnis des Radius der Seilwelle zum Kurbelradius 1 : 2, so ist die ganze Gesamtübersetzung $1 : 4 \times 2 = 1 : 8$, die Kraft ist also $1/_8$ der Last. An der Winde ist noch eine Bremsvorrichtung angebracht. Beim Niederlassen von Lasten kann nämlich das Rad r etwas nach rechts auf der Welle verschoben werden, so daß es außer Eingriff mit dem Rade R kommt;



68. Potenzflaschenzug. 69. Differentialflaschenzug.

die Welle dreht sich also allein, ohne die Kurbeln, und mit der Bremse wird die Geschwindigkeit reguliert. Um die Bremsscheibe B ist ein Stahlbremsband i gelegt, welches an dem einen Ende bei C befestigt ist; das andere Ende sitzt an dem Bolzen h des gebogenen Winkelhebels H, und k ist der feste Drehpunkt. Wird der Hebel am Handgriff

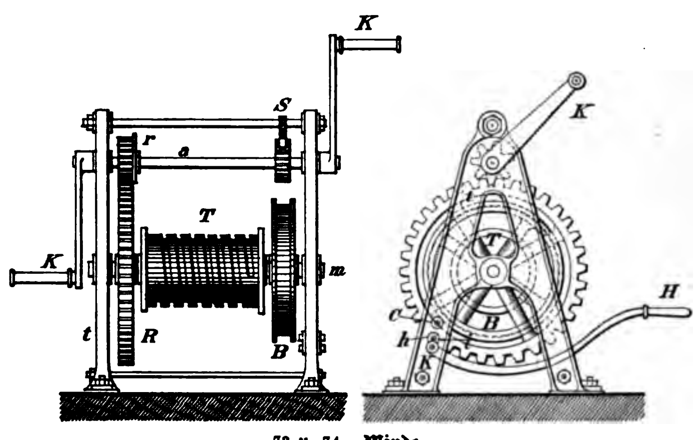


70. Rad an der Welle. 71. Zur Theorie des Rades an der Welle. 72. Haspel mit aufrecht stehender Welle.

nach oben gedrückt, so zieht der kurze Hebelarm k h mit großer Kraft das Bremsband an, welches durch seinen Druck auf die Bremsscheibe die Rolle arretiert, und die Geschwindigkeit je nach dem am Bremshebel ausgeübten Druck regelt. Räderübersetzungen können viel weiter gehen, durch Verwendung mehrerer Räderpaare, wie Abb. 75 zeigt. Von der Kraft angetrieben wird das Zahnrad r_1, dasselbe greift in das Rad R_1; die Übersetzung beträgt 1 : 4. Auf der Achse von R_1 sitzt das kleine Rad r_2, welches in das

fünfmal größere Rad R_2 eingreift; schließlich betreibt das auf der Achse von R_2 sitzende Zahnrad r_3 das Rad R_3, dessen Durchmesser wieder sechsmal größer ist, als derjenige von r_3. Das Verhältnis der Durchmesser und damit der Zähneanzahl bei den drei Räderpaaren ist also 1 : 4, 1 : 5, 1 : 6 und das gesamte Übersetzungsverhältnis hiernach $1 : 4 \times 5 \times 6 = 1 : 120$.

Durch das Räderwerk wird also eine auf die erste Welle ausgeübte Kraft auf das 120fache vergrößert, die Geschwindigkeit hierbei ebenso viel verkleinert. Umgekehrt kann man auch für besondere Zwecke die Geschwindigkeit auf Kosten der Intensität der Kraft vergrößern. Bei vorliegendem Beispiele braucht nur die Kraft an der Welle des letzten großen Zahnrades R_3 einzugreifen, um die Welle des Rades r_1 in 120mal schnellere Rotation zu versetzen. Auch dies kommt in der Praxis vor, wenn auch weniger häufig. Zur Vergrößerung der Geschwindigkeit, z. B. zum Antrieb von Zentrifugalpumpen, Ventilatoren, Zentrifugen, Elektrodynamomaschinen, Bohrmaschinen, Drehbänken, werden meist Riemen- oder Seilübertragungen angewendet, welche auf demselben Prinzip beruhen. Das Schwungrad oder die Riemenscheibe einer Kraftmaschine (s. Abb. 76) treibt durch Riemen die $^1/_3$ so große Riemenscheibe S_1 der Transmissionswelle; auf letzterer sitzt die Scheibe S_2, welche durch einen Riemen ein Vorgelege mit halb so großer Scheibe S_3 in Drehung versetzt. Von dem Vorgelege aus wird durch einen letzten Antriebsriemen mittels der Scheiben S_4 und S_5 die Welle einer Drehbank betrieben; wenn das Verhältnis der letzten beiden Scheiben z. B. 3 : 1 ist, so macht die Drehbankwelle $3 \times 2 \times 3 = 18$mal so viel Umdrehungen in der Minute als die Dampfmaschine.



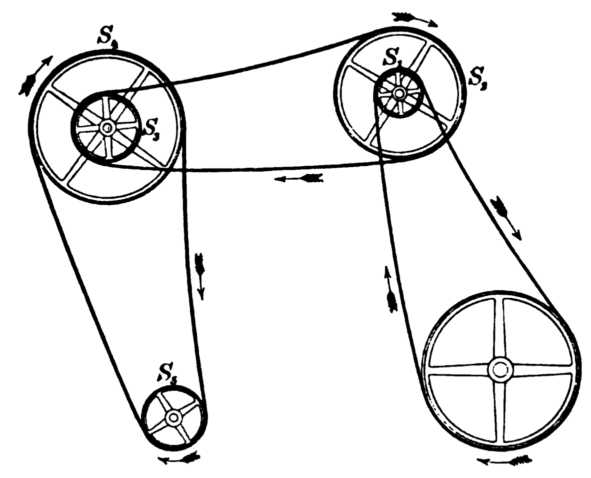
73 u. 74. Winde.

Bei den Kurbeln wirken gleichzeitig die Muskelkraft der Arme und das Körpergewicht des Arbeiters, indem letzterer sich beim Niedergang der Kurbel teilweise auf dieselbe legt. Es ist auch vielfach versucht worden, Vorrichtungen zu konstruieren, bei denen nur die Muskelkraft der Beine wirkt, doch meist mit schlechtem Erfolg. Nur für solche Arbeiten, bei denen der sitzende Mensch seine Hände für den Antrieb des Apparates nicht frei hat, sondern gleichzeitig für andere Beschäftigung benutzen muß, ist für kleinere Arbeitsleistungen die Bewegung von Maschinen durch die Muskelkraft der Beine allgemein in Gebrauch, so bei dem Webstuhl, der Nähmaschine und dem Schleifstein, deren Bewegungsmechanismus aus einem vom Fuße betriebenen einarmigen Hebel und einer Kurbel besteht, auch bei der Töpferscheibe, die ein Wellrad mit vertikaler Achse darstellt.



75. Räderübertragung.

Die beste Anwendung des Prinzips des Wellrades für menschliche Arbeitsleistung sind die Laufräder, Treträder oder Sprossenräder, bei denen das Gewicht des Menschen zur Arbeitsleistung verwendet wird. Dieselben sind seit langer Zeit vielfach in Benutzung gewesen und sind in Breiten ausgeführt worden, daß bis zu 20 Menschen nebeneinander in einem Stufenrad gearbeitet haben. Zahlreich werden bis in unsere Zeit Sprossenräder in den vielen Steinbrüchen südlich von Paris, bei Montrouge und Beaugirard ver-



76. Riementransmission.

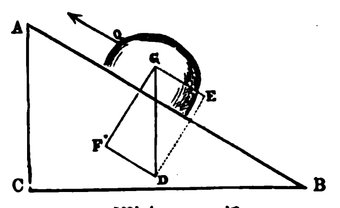
wendet. Abb. 77 stellt ein solches für zwei Arbeiter dar. Statt der Stufen haben diese Räder seitliche Sprossen, z. B. bei 9,8 m Raddurchmesser deren 96. Die Wirkungsweise der Stufenräder und Sprossenräder ist leicht zu ersehen; der Arbeiter steigt an den Sprossen oder auf den Stufen in die Höhe, das Rad beginnt sich unter dem einseitigen Umfangsdrucke zu drehen, und je schneller der Mann steigt, desto schneller dreht sich das Rad. Die höchste Leistung findet statt, wenn der Arbeiter in der Horizontalen gegenüber der Achse arbeitet.

Auch für Betrieb durch Tiere hat man Treträder konstruiert; man sieht solche, in denen Hunde oder Esel laufen, noch häufiger am Niederrhein in kleineren landwirtschaftlichen Anwesen, zum Betriebe kleiner Maschinen, zur Herstellung von Butter, zum Häckselschneiden u. dgl.

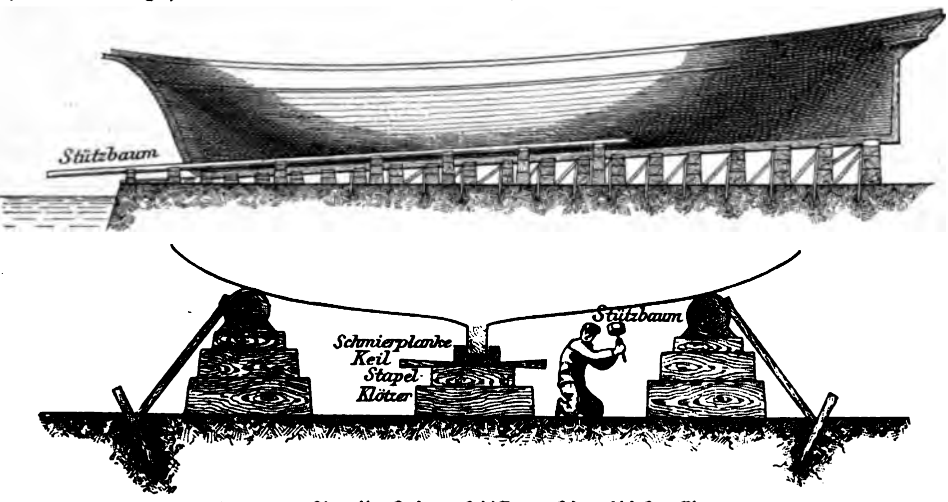

77. Tretrad.

Die schiefe Ebene. Ein Wagen läuft auf einer geneigten Bahn von selbst hinunter; die Kegelkugel rollt in der schrägen Rinne längs der Bahn nach vorn. Wir haben hier die Wirkung der schiefen Ebene. Der Körper besitzt, ehe er sich zu bewegen anfängt, eine potentielle Energie, die sich in aktuelle Energie oder lebendige Kraft umwandelt. Der Kegeljunge hat zuvor die Kugel aufgehoben bis zum oberen Ende der Rinne; hierbei hat er mechanische Arbeit geleistet, welche in der Kugel aufgespeichert wurde und beim Hinabrollen zum Ausdruck kommt. Bei dem Niederrollen entwickelt die Kugel durch Überwindung der Reibung an der Rinne, des Luftwiderstandes und schließlich durch den Anprall am Ende der Bahn genau ebenso viel Arbeit, wie vorher der Junge aufgewendet hat, sie zu heben, oder wie sie beim direkten Herabfallen von ihrer Höhe auf die Erde hätte leisten können. — Die Gesetze der schiefen Ebene beruhen auf der Zerlegung von Kräften. In der Abb. 78 heißt AB die Länge, BC die Basis, AC die Höhe der schiefen Ebene und das Verhältnis AC : BC die Steigung. Die senkrecht nach

unten wirkende Schwere des Körpers, die in der Abbildung durch G D dargestellt ist, zerlegt sich in die zwei Komponenten G F und GE; erstere wird als Druck von der schiefen Ebene aufgenommen und verschwindet, letztere sucht den Körper die Ebene hinabzuziehen. Um den Körper also in seiner Lage zu halten oder hinaufzuziehen, muß eine ebenso große oder größere Kraft Q entgegengesetzt auf den Körper wirken. Wie leicht geometrisch nachweisbar, ist das Verhältnis G E : G D dasselbe wie A C : B C; die Kraft Q hängt also von der Steigung der schiefen Ebene ab und ist gleich der Last multipliziert mit dem Steigungsverhältnis. Man kann also eine Last auf einer schiefen Ebene mit geringerer Kraft auf eine bestimmte Höhe bringen, also bei direkter senkrechter Hebung erforderlich ist; dafür wird der Weg um so weiter. Es bleibt wieder das alte Verhältnis bestehen: Kraft × Kraftweg = Last × Lastweg; also Q oder G E × A B = G D × A C. Die Ägypter haben wahrscheinlich zum Transport der ungeheueren Steinmassen für die Pyramiden — zu der des Königs Chufu



78. Wirkungsweise der Kraft an der schiefen Ebene.



79 u. 80. Stapellauf eines Schiffes auf der schiefen Ebene.

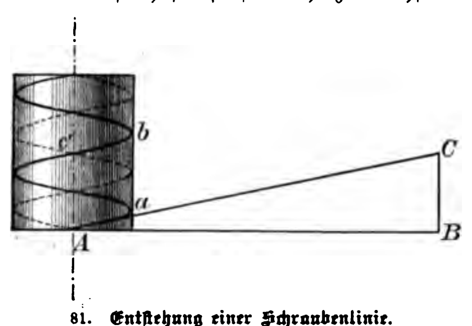
würden, wenn wir sie in Ziegelsteinen unseres normalen Formats ausführen wollten, rund 1200 Millionen Steine gehören — die schiefe Ebene benutzt; für die Pyramiden von Gizeh wurde zur Heranschaffung der Steine von den Brüchen aus ein langer, gleichmäßig schräger Damm gebaut, dessen Überreste noch sichtbar sind, welcher bis auf die 40 m hohe Felsterrasse führte, auf der sich die Pyramiden erheben. Ebenso stellen heute noch die Arbeiter, wenn ein schwerer Gegenstand, ein Steinblock oder Maschinenteil, in die Höhe geschafft werden soll, z. B. auf einen Wagen, wenn das Gewicht zum direkten Heben zu groß ist, durch Bohlen oder eine besonders für solche Zwecke bereit gehaltene „Schrotleiter“ eine schiefe Ebene her, auf der der Gegenstand hinaufgeschoben oder -gezogen wird. Ferner wird das Prinzip der schiefen Ebene angewendet auf Bahnhöfen und in großen Fabriketablissements, indem Eisenbahnwagen mit ihrer Last durch eine hydraulische Hebelvorrichtung um eine gewisse Höhe gehoben werden, worauf sie auf geneigten Geleisen von selbst nach den Stellen laufen, wo sie entladen werden sollen.

Der Stapellauf der Schiffe geschieht auf einer schiefen Ebene. Abb. 79 zeigt den Rumpf eines hölzernen Segelschiffes auf der Ablaufhelling, zum Ablaufen bereit stehend. Das Kielholz rutscht auf der ausgeschnittenen mit Seife bestrichenen sogenannten Schmierplanke (siehe Abb. 80), welche eine nach der Erfahrung bemessene Neigung nach dem Wasser hin hat. Rechts und links sind glatte Stützbäume angebracht, welche den Schiffskörper im Gleichgewicht halten. Mittels der Keile wird die auf den Stapelklötzen liegende

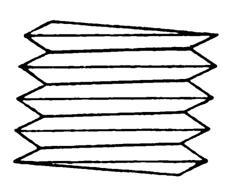
Schmierplanke überall gleichmäßig dicht unter den Kiel getrieben. Bei größeren Schiffen treten an Stelle der einen mittleren zwei seitliche Schmierplanken.

Eine Anwendung der schiefen Ebene im gewöhnlichen Leben ist der **Keil**; je geringer die Neigung derselben ist, desto größere Kraftwirkungen können mit demselben erzielt werden.

Die Schraube. Von der schiefen Ebene kommen wir zur letzten der zu besprechenden sogenannten einfachen Maschinen, der Schraube. Dreht man die schiefe Ebene A B C (Abb. 81) so um einen senkrechten Kreiscylinder, daß die Linie A B stets in der Ebene der Grundfläche, also senkrecht zur Achse bleibt, so beschreibt A C auf dem Cylinder eine Schraubenlinie. Dieselbe ist überall gegen die Horizontale um den Winkel B A C oder den Steigungswinkel geneigt. Der Abstand einer Windung von der nächsten in der Vertikalen, A c' oder a b, ist die **Ganghöhe**; eine ganze Windung der Linie um den Cylinder, also die Linie von A bis c' heißt ein Schraubengang. Für die praktische Ausführung von Schrauben hat man verschiedene Gangprofile, von denen besonders das gleichschenkelige Dreieck für die scharfgängige und das quadratische für die flachgängige Schraube in Betracht kommen. Die Abb. 82 u. 83 zeigen Schrauben mit diesen Gewinden. Die Schrauben können noch ein- oder mehrgängig sein; bei letzteren kommen auf eine Ganghöhe mehrere parallel nebeneinander laufende Windungen, und alle haben dieselbe Steigungshöhe. In Abb. 81 ist ein zweiter Gewindegang punktiert eingezeichnet. Bei einer zweigängigen Schraube hat natürlich das Schraubenprofil nur die halbe Höhe, wie bei der eingängigen. Man wendet die mehrgängigen Schrauben hauptsächlich bei starken Steigungen an, wo das eingängige Profil im Verhältnis zum Schraubendurchmesser zu hoch werden würde. Schließlich unterscheidet man noch rechts- und linksgängige Schrauben; rechtsgängig heißt eine Schraube, wenn das Gewinde sich, von oben betrachtet, wie der Zeiger der Uhr dreht. Zu jeder Schraube gehört eine Schraubenmutter, welche, wie man sich ausdrücken kann, genau das Negativ des Schraubenbolzens ist. Sie hat Innengewinde, genau demjenigen der Schraube entsprechend, und kann mit diesem genau passend auf die Schraube gedreht werden.



81. Entstehung einer Schraubenlinie.


82. Scharfgängige Schraube.


83. Flachgängige Schraube.

Die scharfgängigen Schrauben werden besonders in bekannter Weise zur Befestigung verwendet. Die flachen Schrauben dagegen dienen vorzugsweise dazu, eine drehende Bewegung unter Arbeitsleistung in eine geradlinig fortschreitende zu verwandeln. Wird eine Schraube durch äußere Kraft, die tangential an ihrem Umfange angreift (wie beim Wellrad), in Drehung versetzt, so übt sie mit ihren schrägen Flächen auf ihre aufgeschraubte Mutter einen Druck aus, wenn diese verhindert wird, an der Drehung teilzunehmen. Bei jeder Drehung bewegt sich die Schraube in der Achsenrichtung gegen die Mutter relativ um eine Ganghöhe. Ist die Mutter befestigt, so daß sie sich weder drehen noch in der Längsrichtung verschieben kann, so bewegt sich die Schraube; ist umgekehrt die Schraube verhindert, sich in der Achsenrichtung fortzubewegen, so wird die Mutter je nach der Drehungsrichtung nach der einen oder anderen Seite um eine Ganghöhe verschoben. Umgekehrt kann auch die Schraube gegen Drehung festgestellt sein und die Schraubenmutter durch die Kraft gedreht werden, wobei dieselben beiden Möglichkeiten bezüglich der Längsbewegung stattfinden.

In allen vier Fällen ist die Arbeitsleistung oder das Verhältnis der aufzuwendenden Kraft zu der zu leistenden Arbeit dasselbe. Die Regel hierfür ist allgemein: Die Kraft

verhält sich zur Last, wie die Höhe eines Schraubenganges (gleichviel ob die Schraube ein- oder mehrgängig ist) zum mittleren Umfang der Schraube. Hierbei greift die Kraft direkt an der Schraube, ohne Hebel an. Diese Beziehung leitet sich von der schiefen Ebene her. Bei einer Drehung wird die Last um eine Ganghöhe bewegt, entsprechend der Höhe der schiefen Ebene B C (siehe Abb. 81); dabei ist der Kraftweg gleich einem Schraubenumfang oder gleich der Basis A B. Es ist also dasselbe, als wenn die Last die schiefe Ebene A C hinaufgezogen worden wäre. Nun greift aber in Wirklichkeit die Kraft nie direkt am Schraubenbolzen, sondern stets an einem Hebelarm an, und die obige Regel ändert sich hierdurch in folgende Form: Kraft × Hebelarm (von Schraubenachse bis zum Angriffspunkt der Kraft) ist gleich dem Produkt Last × Schraubenradius × Steigungsverhältnis; unter letzterem ist das Verhältnis der Ganghöhe zum Schraubenumfang verstanden $\left(\frac{A\,c'}{A\,B}\right.$ bei Abb. 81). Oder: $\text{Kraft} = \text{Last} \times \frac{\text{Schraubenradius} \times \text{Ganghöhe}}{\text{Hebelarm} \times \text{Schraubenumfang}}$.

Man wendet solche Schrauben an zum Pressen und zum Heben von Lasten. Als **Preßschraube** ist die Anwendung bei der Kopierpresse bekannt. Bei derselben ist die Mutter in dem Bügel gegen Drehung und Verschiebung unbeweglich befestigt, oder in den Bügel selbst ist das Muttergewinde eingeschnitten; die Schraubenspindel ist drehbar und in der Längsrichtung beweglich. An ihr greift oben mittels Handrades oder zweiarmigen Hebels die Kraft an und übt beim Niederdrehen eine bedeutende Pressung aus. Ähnlich sind die Münzen- und Medaillen-Prägepressen, die Weinpressen, Buchbinderpressen u. s. w. Die Schrauben dienen auch dazu, eine langsame, sehr gleichmäßige **Vorwärtsbewegung** zu bewirken. So wird z. B. bei dem „Selbstgang“ von Drehbänken der Support, in welchem der Drehmeißel eingespannt ist, mit der Mutter einer flachgängigen Schraubenspindel verbunden. Die Spindel wird durch Zahnräder während des Ganges der Drehbank in Umdrehung versetzt und zwar durch Verwendung geeigneter Radsätze mit beliebiger Geschwindigkeit; die Spindel ist an einer Bewegung in der Längsrichtung verhindert, die am Support sitzende Mutter dagegen gegen Drehung festgestellt. Der Support wird also je nach der Umdrehungsgeschwindigkeit der Welle mit verschiedener Geschwindigkeit sehr gleichmäßig verschoben, und der Drehmeißel wird auf diese Weise an dem abzudrehenden Gegenstande vorbeigeführt.

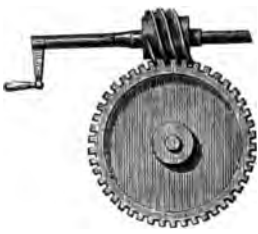

84. Schraube ohne Ende.

Abb. 84 stellt noch eine sogenannte **Schraube ohne Ende** dar, wie sie im Maschinenbau vielfach verwendet wird. Ein Schraubengewinde ist so konstruiert, daß seine Gänge in ein dazu passend geformtes Zahnrad eingreifen; bei der Drehung schiebt der schräge Schraubengang das Rad fort, und mit jeder Umdrehung greift der Anfang des Gewindes in die nächstfolgende Zahnlücke.

Mikrometerschrauben sind feine Schrauben mit sehr flacher Steigung, also feinem Gewinde; sie dienen zum Einstellen sehr kleiner genauer Entfernungen, oder um sehr kleine, regelmäßige und kontrollierbare Bewegungen hervorzubringen, hauptsächlich für feine physikalische und astronomische Instrumente, Teilmaschinen, Nivellierinstrumente u. s. w. Man kann mit Hilfe derselben leicht $^1/_{100}$ mm genau und sicher einstellen, was natürlich durch Stellen oder Verschieben direkt von der Hand vollständig unmöglich ist.

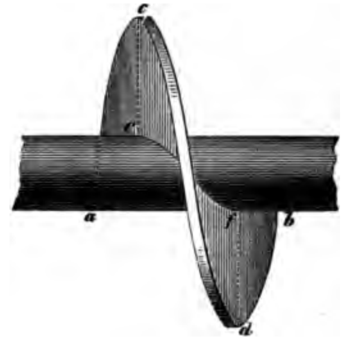
Eine besondere Anwendung der Schraube ist die **Schiffsschraube**. Wie wir bei den Druckschrauben gesehen haben, drückt eine Schraube bei der Drehung gegen ihre Mutter, wenn letztere feststeht, und die Schraube selbst bewegt sich in der Längsrichtung. Die Schraubenmutter ist das Wasser; die Schraube dreht sich in demselben, findet Widerstand und bewegt sich und damit das ganze Schiff, mit welchem sie fest verbunden ist, in der Längsrichtung fort. Stellt man sich das Wasser als nicht ausweichend vor, so würde jeder Gang der Schraube sich in das Wasser wie in eine Schraubenmutter eindrehen; bei jeder Umdrehung der Schraube würde sich also das Schiff um die Gewindeganghöhe fortbewegen. Thatsächlich beträgt aber die Fortbewegung weniger, weil das Wasser ja dem Druck ausweicht. Die Differenz heißt der Rücklauf oder Slip; er beträgt etwa 10 bis

15 %. Nun gibt aber das Wasser auf eine kleine Fläche keinen großen Gegendruck, da es eben ausweicht; die Druckflächen müssen deshalb sehr groß gemacht werden, und die Bewegung muß eine sehr schnelle sein, damit die Schraubenflächen so viel Widerstand finden, um eine genügende Wirkung hervorbringen zu können. Aus diesen Gesichtspunkten haben die Schiffsschrauben oder Propeller ganz andere Formen erhalten, als gewöhnliche Schrauben, und auf den ersten Blick scheint ein Propeller mit einer Schraube überhaupt nichts gemein zu haben.

Die ersten Versuche, mittels Schrauben Schiffe zu bewegen, sind schon sehr alt. Der erste Erfinder ist Daniel Bernoulli (1700—1782), ein hervorragender Physiker und Mathematiker; er faßte die Idee bereits vollkommen richtig auf und wollte durch eine Kraft im Schiff eine Welle mit einer außen im Wasser befindlichen Schraube drehen und so das Schiff nach Belieben mit dem Strome oder gegen denselben bewegen. Er reichte eine Denkschrift über seine Erfindung 1752 der französischen Akademie ein, die deren Wert durch Gewährung eines Preises anerkannte; doch blieb seine Arbeit und die ganze Erfindung in weiteren Kreisen ganz unbekannt und hatte keine weiteren Folgen. Trotzdem und obwohl eine praktische Ausnutzung der Erfindung in größerem Maßstabe damals auch wohl noch nicht möglich gewesen wäre, da für die Drehung der Schraubenwelle nur Menschenkraft oder Tierkraft zur Verfügung standen, muß Bernoulli die Priorität zuerkannt werden. Auch nachdem die Dampfmaschinen durch James Watt in den siebziger Jahren des 18. Jahrhunderts so weit vervollkommnet waren, daß dieselben in England und auf dem Kontinent in vielen Ausführungen mehr und mehr allgemein Eingang fanden, dauerte es noch ein halbes Jahrhundert, ehe die Dampfkraft zum Betriebe von Schiffen mittels der längst erfundenen Schiffsschraube allgemeiner praktisch zur Verwendung kam. Die Erbauung des ersten Dampfschiffes überhaupt wird gewöhnlich Fulton zugeschrieben, der 1807 in New York den Raddampfer Clermont vollendete; aber mit Unrecht, denn schon mehrere Jahre vor ihm hatte der Amerikaner Stevens die erste Schiffsdampfmaschine gebaut und mit derselben erfolgreich das 15 m lange Boot Phönix mittels zweier Schrauben betrieben. Der erste wirklich ausgeführte und in Betrieb gewesene Dampfer war also kein Raddampfer, sondern ein Schraubendampfer, und der erste Erbauer einer brauchbaren Schiffsmaschine ist Stevens, wie er auch die längst vergessene Erfindung der Schiffsschraube von neuem machte und sie zuerst praktisch verwertete. Aber auch dieser erste Schraubendampfer von Stevens hatte noch mehrere Jahrzehnte hindurch keine weitere Einwirkung auf die Entwickelung der Dampfschiffahrt. In den zwanziger Jahren begann sich aber das Bedürfnis nach einer Verbesserung des Systems der Dampfschiffe fühlbar zu machen, da die Raddampfer für Seefahrt schwere Nachteile hatten. Der Schiffsbau sowie die Dampfmaschinen waren inzwischen sehr vervollkommnet worden, und die folgenden Männer konnten auf ganz anderen Grundlagen arbeiten, als ihre Vorgänger. Der Österreicher Ressel, der Franzose Sauvage und der Engländer Smith waren es, deren Bemühungen die thatsächliche allgemeine praktische Einführung der Schiffsschraube in erster Linie zu verdanken ist. Ressel nahm 1827, Sauvage 1832 ein Patent auf die Erfindung der Schiffsschraube, Smiths Patent datiert vom Jahre 1835, also acht Jahre später als das Resselsche. Jedenfalls erntete er allein die Früchte seiner Erfindung, und von seiner Heimat England nahm die praktische Anwendung der Schiffsschraube ihren Ausgang. Davon und von der ungeheuren Bedeutung, die die Schraube heute für den Schiffbau gewonnen hat, wird in einem späteren Bande bei der Darstellung des Schiffbaues des näheren die Rede sein.

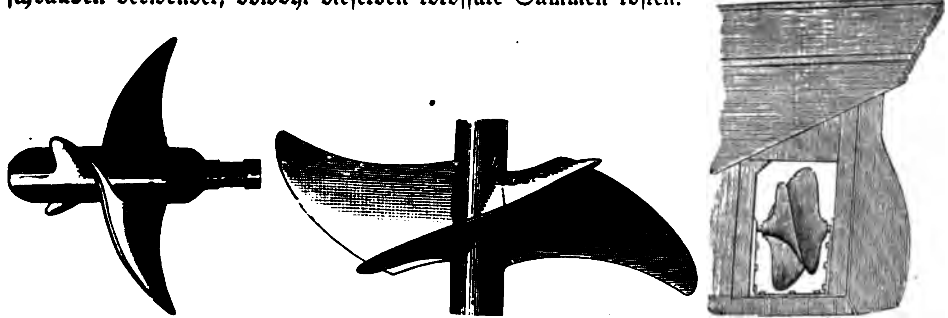
Bei den ersten Ausführungen war die Schiffsschraube noch ein wirklicher voller Schraubengang mit sehr breiter Fläche; Abb. 85 stellt die Schraube des Archimedes dar, die Ganghöhe (a b) betrug $2\frac{1}{2}$ m, der ganze Durchmesser (c d) 2,15 m. Durch einen Unfall brach bei einer Fahrt ein Stück der Schraube ab, etwa bis zu der punktierten Linie f d, so daß nur ein Teil des Ganges übrig blieb. Es zeigte sich aber, daß trotz dieser Beschädigung die Geschwindigkeit nichts einbüßte, im Gegenteil sogar größer wurde. Dies gab einen wertvollen Fingerzeig für die Abänderung der Konstruktion. Man gab den Schrauben nur noch Teile einer Ganghöhe, dafür aber immere stärkere Steigung

und machte sie mehrgängig; anfangs brachte man zwei Gänge mit einer halben Ganghöhe an (Abb. 86), ging dann noch weiter, machte die Steigung noch stärker und nahm vier Gänge, jeden mit nur $^1/_4$ Umgang. Diese Schiffsschraube (Abb. 87) läßt kaum mehr erkennen, daß sie aus einer wirklichen Schraubenfläche hervorgegangen ist. Die beste Wirkung wird bei ruhigem Wasser mit der zweiflügeligen Schraube erreicht; bei stark bewegter See aber, wenn zuweilen das Hinterteil des Schiffes in einem Wellenthal liegt und die Schraube teilweise in der Luft läuft, wird der Gang einer zweiflügeligen Schraube unregelmäßig und die Wirkung unvorteilhaft. Den Seedampfern gibt man allgemein dreiflügelige Schrauben. Bezüglich der besten Form der Schiffsschraube werden bis jetzt immer noch Vorschläge gemacht und Änderungen versucht, welche sich auf Steigung, Flügelform, Durchmesser u. s. w. beziehen. Auf rein theoretischem Wege läßt sich hierbei wenig erreichen, da die Gesetzmäßigkeiten der bei der Schraubenumdrehung auftretenden Wasserbewegung, besonders der entstehenden Wirbel noch sehr wenig bekannt sind, weil sie sich der direkten Beobachtung entziehen und weil sie der analytischen Behandlung zunächst noch unüberwindliche Schwierigkeiten entgegensetzen. Man ist also auf Versuche angewiesen, und diese werden von den ersten Ingenieuren und führenden Schiffbauanstalten immer wieder angestellt.



85. Erste Form der Schiffsschraube.

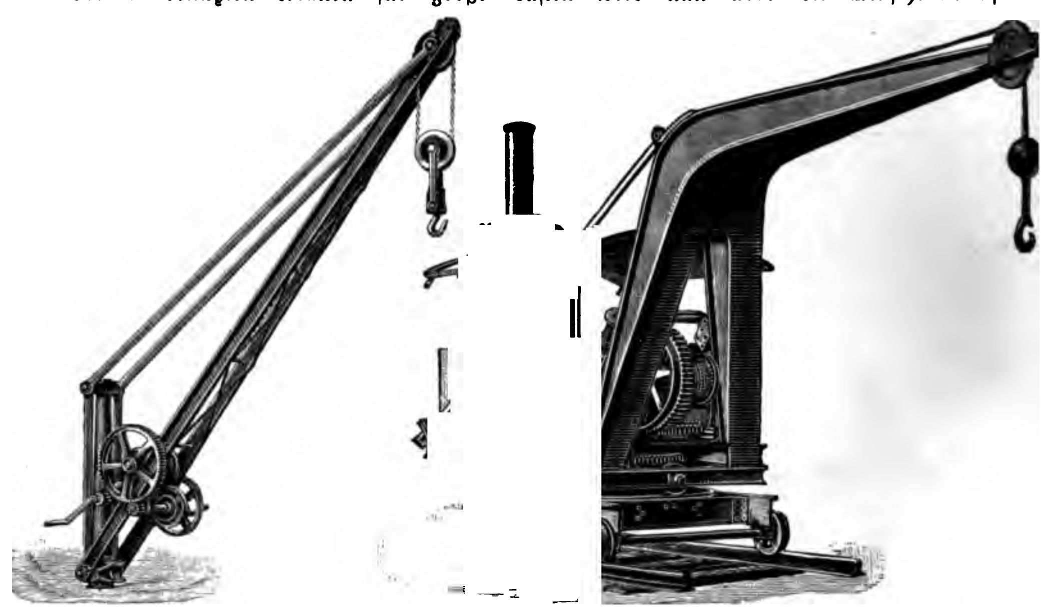
Von großer Wichtigkeit ist, daß die Flächen der Schrauben möglichst glatt sind; die mehr oder weniger große Reibung des Wassers an denselben hat großen Einfluß auf die Geschwindigkeit. So ist z. B. beobachtet worden, daß dieselbe bei einem großen Seedampfer mit Bronzeschrauben eine Seemeile pro Stunde mehr betrug, als unter gleichen Verhältnissen mit gleich großen eisernen Schrauben, die durch Rosten bald rauh werden. Wo eine große Geschwindigkeit von besonderem Wert ist, wie bei den transatlantischen Schnelldampfern und Kriegsschiffen, werden deshalb meist Bronzeschrauben verwendet, obwohl dieselben kolossale Summen kosten.


86. Doppelgängige Schiffsschraube. 87. Viergängige Schiffsschraube. 88. Anordnung der Schiffsschraube.

Bis in die neueste Zeit wurden alle Schraubendampfer, auch die größten, von einer Schraube getrieben, welche hinten aus der Mitte des Schiffes unter der tiefsten Wasserlinie herausstand (Abb. 88). In neuerer Zeit führte das Bedürfnis, die Fahrgeschwindigkeit zu erhöhen, zu der Verwendung von zwei Schrauben. Dieselben sitzen symmetrisch rechts und links von der Mitte, und jede wird selbständig von einer besonderen Maschine betrieben. Die großen Ozean-Schnelldampfer sowie Kriegsschiffe werden jetzt meist nach dem Doppelschraubensystem ausgeführt. Dasselbe hat noch den Vorteil, daß das Schiff bei dem Bruch einer Schraubenwelle oder Schraube mit der anderen unbeschädigten Schraube, wenn auch mit verminderter Schnelligkeit, weiterfahren kann. — Ebenso wie für die Fortbewegung im Wasser hat man auch seit längerer Zeit versucht, die Schraube der Luftschiffahrt dienstbar zu machen, Luftballons durch eine Schraube in beliebiger Richtung zu dirigieren

oder Flugmaschinen durch Schrauben zu betreiben, bis jetzt aber ohne eigentlichen Erfolg, wie wir weiterhin in einer eingehenden Darstellung über die Luftschiffahrt sehen werden.

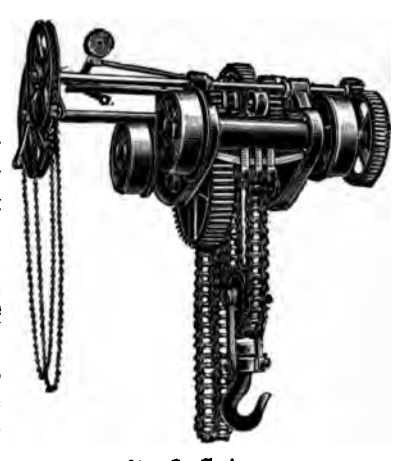
Die Hebezeuge. Durch Kombination der besprochenen einfachsten Hebevorrichtungen, Rolle, Flaschenzug, Wellrad, Kurbel, Winde, sind für große Leistungen, sowohl für Hand- wie Maschinenbetrieb, Hebezeuge konstruiert worden, welche seit langer Zeit für Handel und Industrie vollständig unentbehrlich geworden sind. Für eine größere Maschinenfabrik, ein Walz- oder Hüttenwerk gehört eine vollkommene Einrichtung der Hebe- und der Transporteinrichtungen zu den wichtigsten Grundlagen eines rationellen Betriebes. Die Leistungsfähigkeit von Hafeneinrichtungen hängt in erster Linie mit von der Zweckmäßigkeit der Krananlagen ab, durch welche die einlaufenden Schiffe in möglichst kurzer Zeit entladen (gelöscht), oder beladen werden können. Ein großartiges Beispiel solcher mit allen neuesten Errungenschaften der Technik ausgerüsteten Anlagen bieten die Hamburger Freihafeneinrichtungen. Der Betrieb von Hebevorrichtungen kann durch jede Kraft erfolgen. Schon mit Handkurbeln können recht bedeutende Leistungen erzielt werden. Abb. 89 zeigt einen freistehenden Drehkran einfacher Art; durch zwei Handkurbeln wird mit Zahnrädübersetzung eine Kettentrommel gedreht, deren Kette mit fester und loser Scheibe die Last hebt. Der Kran ist übrigens um den vertikalen Pfosten drehbar, und zwei Mann können mit ihm 2500 kg heben. — Bei vielbenutzten Kränen für große Lasten wird nun aber die Maschinenkraft



89. Freistehender Drehkran. 90. Fahrbarer Dampfkran mit gebogenem Ausleger.

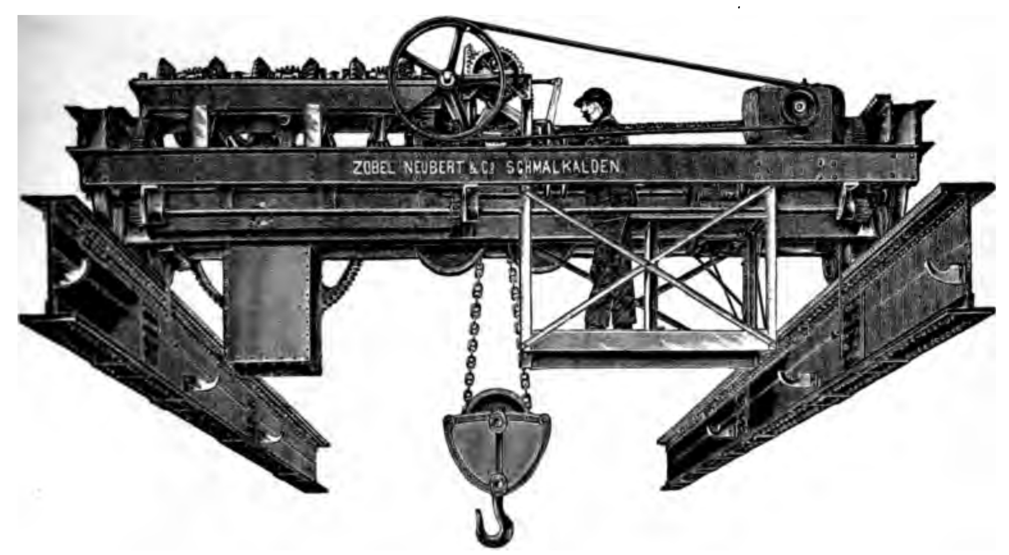
angewendet. Am ältesten sind die Dampfkräne und Dampfseilwinden, welche besonders in Häfen angewendet werden. In Abb. 90 ist ein auf Schienen fahrbarer und auf einer Drehscheibe drehbarer, schwererer Dampfkran mit starkem, gebogenem Ausleger von Meuck & Hambrock in Altona dargestellt. Die Drehung des Kranes erfolgt durch die Maschine selbst. Für sehr große Lasten werden vielfach Hebevorrichtungen durch Druckwasser betrieben, und in den letzten Jahren sind auch elektrisch betriebene Kräne in Anwendung gekommen.

In Fabriken, besonders Eisenwerken und Maschinenfabriken, ist es meist wichtig, nicht nur größere Lasten heben und auf- oder abladen zu können, sondern in den mechanischen Werkstätten und Montagehallen ist es notwendig, schwere Gegenstände mittels maschineller Transportvorrichtungen von irgend einer Stelle nach einer anderen schaffen zu können. Zu diesem Zwecke dienen Laufkräne oder für kleinere Betriebe und besondere kleinere Ab-



91. Laufkatze
(von Zobel, Neubert & Co. in Schmalkalden).

teilungen die Laufwinden oder Laufkatzen. Eine solche ist in der Abb. 91 dargestellt. Dieselbe läuft mit den rechts und links sichtbaren kleinen Rädern auf einem Träger; die Last hängt an dem Lasthaken der losen Rolle eines Differentialflaschenzuges. Mittels eines der beiden, auf der Zeichnung links sitzenden Haspelräder mit Ketten wird der Flaschenzug bedient, also die Last gehoben oder gesenkt; durch die Drehung des anderen Haspelrades wird die ganze Laufkatze nebst der daran hängenden Last auf dem Träger fortgerollt. Ein Fabrikkran mit elektrischem Betriebe, von der Spezialfabrik Zobel, Neubert & Co. zu Schmalkalden, ist noch in Abb. 92 abgebildet. An den beiden Längsseiten des Fabrikraumes laufen zwei auf Säulen oder Wandkonsolen ruhende starke Träger durch die ganze Länge des Raumes. Auf diesen ist ein die Breite des Raumes überspannendes Quergerüst auf Rädern fahrbar. Ein Elektromotor betreibt mittels Riemenbetriebs ein zusammengesetztes Räderwerk; je nach der Einschaltung der verschiedenen Rädergruppen wird 1) mittels Flaschenzuges die an der losen Rolle hängende Last gehoben oder gesenkt,



92. Elektrischer Laufkran.

oder 2) diese Rolle mit der Last mittels kleiner, auf einer Querschiene laufender Räder nach rechts oder links, also quer zur Breite der Werkstätte geführt, oder 3) der ganze Kran mit Last auf den Trägern längs durch den ganzen Raum gefahren. Auf diese Weise ist also jede Stelle des letzteren von dem Lasthaken erreichbar.

Die Zuführung des elektrischen Stromes geschieht durch eine seitlich über dem Kran längs durch die Fabrik gespannte Leitung, an welcher vom Kran aus ein Kontaktarm vorbeigeht. Der dargestellte Kran ist für 10 000 kg Last konstruiert; der Elektromotor hat acht Pferdestärken Leistung und bewegt den ganzen Kran mit 15 m Geschwindigkeit in der Längsrichtung, oder die Katze mit der Last mit 10 m in der Querrichtung pro Minute. An Stelle des elektrischen Antriebes können solche Laufkräne auch von Hand betrieben werden; zur Erzeugung der verschiedenen Bewegungen hängen dann drei Haspelketten herab, welche vom Boden aus bedient werden.

Die hydraulischen Gesetze und ihre Anwendung.

Horizontaler Wasserspiegel. Kanalwage. Nivellierinstrument. Kommunizierende Röhren. Der hydrostatische Druck. Die hydraulische Presse. Heber. Reaktion. Segners Wasserrad. Fließendes Wasser und springende Wasserstrahlen. Spritzflasche. Heronsbrunnen. Wasserstoß. Der hydraulische Widder.

Wenn wir uns an der herrlichen, großen Fontaine zu Wilhelmshöhe bei Kassel erfreuen und einen der dortigen Wasserkünste Kundigen fragen, woher die Kraft rühre, die so gewaltige Wassermassen so hoch in die Höhe schleudert, so erhalten wir wohl die Antwort, dazu sei keine Kraft erforderlich, oder es geschehe durch natürlichen Druck; auf einer in der Nähe, bedeutend höher als die Schloß- und Parkanlagen liegenden Hochebene wird nämlich in großen Wasserbassins im Laufe der Woche so viel Regen- und Grundwasser angesammelt, daß wöchentlich ein- bis zweimal die Wasserkünste für kurze Zeit mit diesen großen Wassermengen gespeist werden können. Wenn ein neuer Dampfkessel in Betrieb genommen werden soll, so wird er zuvor von der Behörde, dem Gewerbeinspektor, untersucht und besonders auf seine Festigkeit geprüft. Die Prüfung geschieht mit einer kleinen Handpumpe, die ohne Mühe mit einer Hand betrieben werden kann. Durch dieselbe wird im Kessel ein Druck erzeugt, doppelt so groß, wie später der Dampfdruck im Betriebe sein wird, wenn der Kessel zum Betriebe einer Dampfmaschine von hundert und mehr Pferdestärken dient.

93. Kanalwage.

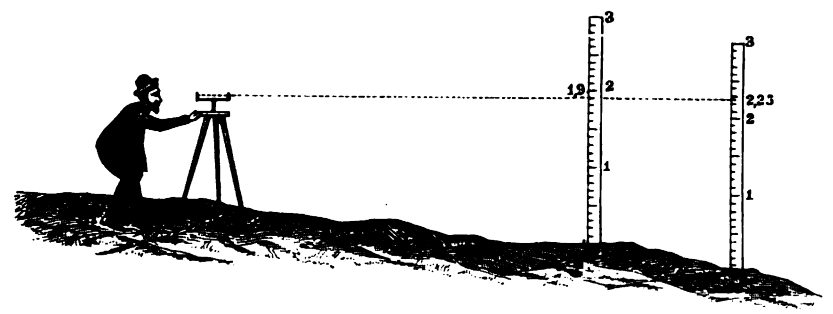
Beide Beispiele zeigen uns Anwendungen der Gesetze der **Hydromechanik** oder der Gesetze über das Gleichgewicht und die Bewegung von Flüssigkeiten, welche wir näher betrachten wollen.

Der Horizont. Bei der schon früher besprochenen Gestaltlosigkeit der Flüssigkeiten und unter dem Einflusse ihrer Schwere muß die Oberfläche derselben sich als Kugelfläche um den Mittelpunkt der Erde gestalten. Für die Fälle des gewöhnlichen Lebens bedeutet dies, ihre Oberfläche ist **horizontal**. Daß aber thatsächlich große Wasserflächen kugelförmige Oberfläche haben, zeigt die bekannte Erscheinung, die als Beweis für die Kugelgestalt der Erde angeführt wird, daß wir auf freiem Meere aus der Ferne auf uns zukommende Schiffe zuerst am Horizont mit der Mastspitze aus dem Wasser auftauchen sehen; allmählich steigt beim Näherkommen der Schiffsrumpf empor, vorher war das Schiff eben hinter der Wölbung des Wassers verborgen.

Der Begriff und die Feststellung der Horizontalen beruht auf der Eigenschaft des Wassers, daß seine Oberfläche senkrecht zur Schwerkraft liegt. Wir haben also in dieser Eigenschaft ein Mittel, welches das Lot ergänzt. Von dieser Eigenschaft wird sehr viel Gebrauch gemacht. Die verbreitetste und bekannteste Anwendung ist die **Wasserwage** oder Libelle, welche wohl so allgemein bekannt ist, daß wir über sie weggehen können. Für die Feststellung der Horizontalen auf größere Längen, welche durch die Wasserwage nur umständlich durch häufig wiederholtes Aufsetzen der Setzlatte möglich ist, durch welche die Messung überdies ungenau wird, diente früher die **Kanalwage**, welche schon im Altertume angewendet und bis auf unsere Zeit nur wenig verändert wurde. Jetzt ist sie von den Nivellierinstrumenten ziemlich verdrängt worden, aber man sieht noch hier und dort die Bauhandwerksmeister mit der Kanalwage arbeiten. Für den Bau von Häusern, zur Festlegung der Horizontalen in verschiedenen Höhen an verschiedenen Punkten der Mauern ist sie in der That immer noch ein sehr brauchbares Instrument, das seinen Zweck ebenso gut erfüllt, wie das kompliziertere und teuere Nivellierinstrument; vor letzterem hat es noch den Vorzug, daß es nicht bei jeder Aufstellung sorgfältig richtig eingestellt zu werden braucht. Wie Abb. 93 zeigt, besteht die Kanalwage aus einer Röhre,

welche an beiden Enden nach oben gerichtete Kniestücke trägt; in diese werden Glasröhren eingedichtet. Die Röhre wird so weit mit Wasser gefüllt, daß dieses bis zu beliebiger Höhe in den Glasröhren steht. Die ganze Vorrichtung wird mittels eines Stativs (Dreibocks) so aufgestellt, daß die Röhren etwa 1,40 m hoch über dem Boden stehen. Der Wasserspiegel bei b und c liegt in jeder beliebigen Stellung genau in der Horizontalen. Visiert man über diese Spiegel fort, so ist die Sehrichtung abcx eine Horizontale. Will man nun die Höhenlage verschiedener Punkte zu einander, oder zu einem bestimmten, sogenannten Fixpunkte feststellen, so setzt man auf diese Punkte eingeteilte Maßlatten. Trifft z. B. die Visierlinie auf der Maßlatte (Nivellierlatte) in einem Punkte das Maß 1,90 m (s. Abb. 94), bei einem anderen Punkte 2,25 m, so liegt letzterer 35 cm tiefer als ersterer.

Daß die Wasserspiegel in beiden Röhren sich stets genau horizontal einstellen, beruht auf dem Gesetze der kommunizierenden Röhren. Nach demselben steht die freie Oberfläche einer im Zusammenhang stehenden, nicht bewegten Flüssigkeit überall in derselben Höhe, gleichviel, ob der Spiegel zusammenhängend ist, oder in einzelnen Röhren getrennt erscheint; hierbei ist die Form, die Lage, die Weite der Röhren gleichgültig. Wenn in die beiden Schenkel von kommunizierenden Röhren Flüssigkeiten von verschiedenem spezifischen Gewichte, z. B. in den einen Schenkel Wasser, in den anderen Öl



94. Nivellieren mit der Kanalwage.

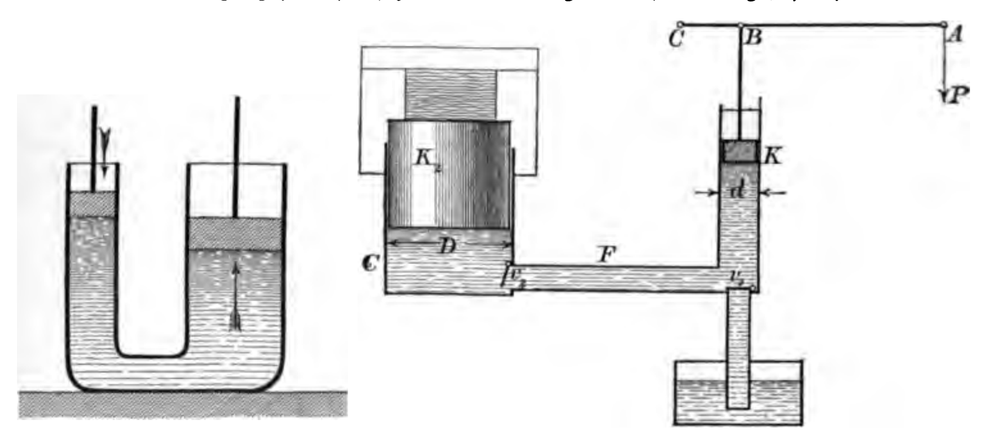
gefüllt werden, so stehen die Spiegel nicht in gleicher Höhe; vielmehr steht die leichtere Flüssigkeit höher. Dies ist leicht einzusehen; da beide Flüssigkeitssäulen sich das Gleichgewicht halten sollen, müssen sich ihre Höhen umgekehrt verhalten wie ihre spezifischen Gewichte.

Um auf weitere Entfernungen, auf welche das freie Auge nicht mehr die Zahlen oder die genaue Einteilung der Nivellierlatte bei Anwendung der Kanalwage erkennen kann, Höhen bestimmen, oder „nivellieren" zu können, hat man die Wasserwage mit einem Fernrohr verbunden, woraus das längst für den Ingenieur und den Feldmesser unentbehrlich gewordene Nivellierinstrument entstanden ist. Abb. 95 stellt ein solches der einfachsten Art dar. Die obere in einem Metallgehäuse befindliche Wasserwage ist mit dem darüber befindlichen Fernrohr so verbunden, daß die Achsen beider sehr genau parallel sind; Libelle und Fernrohr sind um eine genau senkrecht zu ihren Mittellinien stehende vertikale Achse drehbar. Wird nun mittels der Stellschrauben das Instrument auf dem Stativ so eingestellt, daß die Wasserwage genau horizontal liegt oder „einspielt", so ist auch die Fernrohrachse genau horizontal. Man kann also statt über den Spiegel der Wasserwage durch das Fernrohr visieren. Die Anwendung ist im übrigen genau dieselbe wie bei der Kanalwage. Wenn man nicht nur zwei oder mehrere genau hintereinander liegende Punkte in ihrer Höhenlage vergleichen, sondern auch rechts und links liegende Orte einnivellieren will, dann muß von vornherein das Instrument so eingestellt werden, daß die Wasserwage in allen Lagen bei der Drehung um die Vertikalachse einspielt; die Libellen- und die Fernrohrachse müssen also bei der Drehung einen genau horizontalen Kreis beschreiben. Mit einem guten größeren Nivellierinstrumente lassen sich außerordentlich genaue Höhenmessungen vornehmen; bei einer Länge von 1000 m läßt sich leicht eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern erzielen.

Das Gesetz der kommunizierenden Röhren wird häufig bei **Wasserleitungen** angewendet, wenn die Rohrleitung ein Thal durchschneidet, oder einen Fluß kreuzt, indem dieselbe nicht zur Beibehaltung eines gleichmäßigen Gefälles über die Bodensenkung hinweggeführt wird, sondern an dem einen Thalabhang hinab und am andern wieder hinaufgeführt wird. Den Römern scheint das Prinzip der kommunizierenden Röhren oder wenigstens eine solche Anwendung bei ihren in sonstiger Beziehung großartigen Wasserleitungsbauten nicht bekannt gewesen zu sein, denn sie führten ihre Leitungen in langen auf hohen Gewölbebogen gemauerten Aquädukten über die Thäler fort. So betrug z. B. die Länge der Leitung Aqua Marcia 100 km, weil sie möglichst in gleichmäßigem Gefälle, also unter Vermeidung der Kreuzung von Thaleinschnitten an den Thalhängen sich hinzog, während die direkte Entfernung nur 53 km betrug. Die Aqua Claudia war 68,7 km lang mit über 14 km Aquädukte. Teile dieser großartigen Bauwerke bestehen noch und versorgen bis auf den heutigen Tag Rom mit Quellwasser. Es mag allerdings auch möglich sein, daß die Erbauer dieser monumentalen Werke durch diese gleichzeitig sich selbst zum eigenen Ruhme dauernd sichtbar Denkmäler haben setzen wollen, daß also vielleicht nicht Unkenntnis der Möglichkeit, die Leitungen dem Terrain entsprechend, mit Gefälle oder Steigung zu führen, zu der Erbauung der Aquädukte geführt hat.



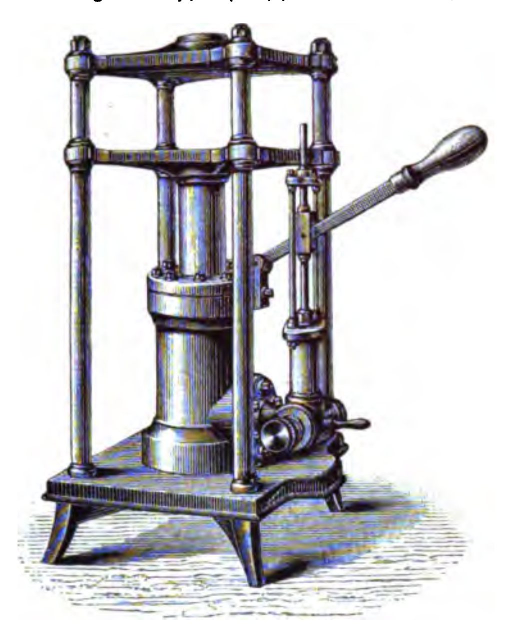
95. Nivellierinstrument.



96. Hydrostatischer Druck. 97. Hydraulische Presse.

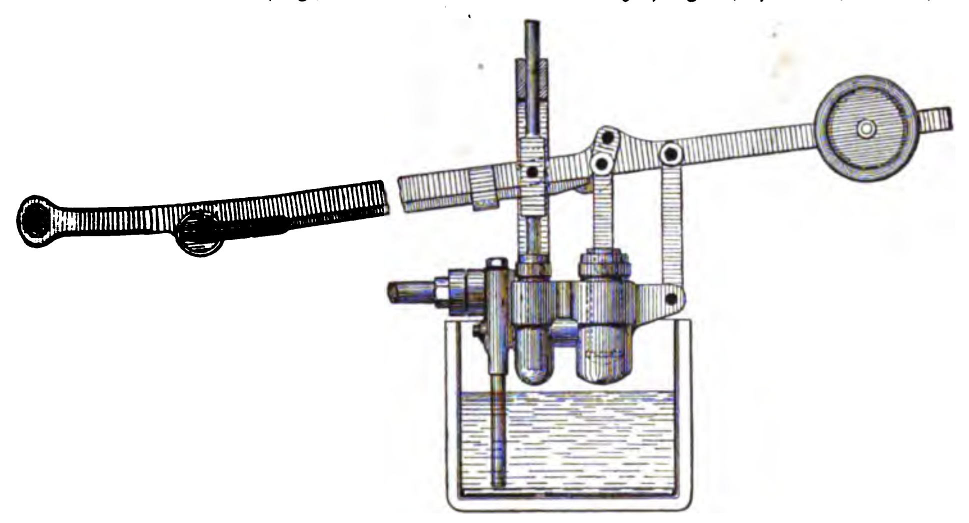
Der hydrostatische Druck. Ein auf Wasser in einem vollständig gefüllten und geschlossenen Gefäße ausgeübter Druck pflanzt sich nach allen Seiten gleichmäßig fort. Das Wasser übt auf die ganze Innenfläche des Gefäßes, die Wände, den Boden, den Deckel, gleichviel wie dieselben geformt sind, einen gleichmäßigen Druck aus, der auf jede Flächeneinheit so groß ist, wie derjenige des äußeren Druckes auf die Flächeneinheit. Wird der kleinere Kolben in Abb. 96 mit 10 kg Druck auf das Wasser gepreßt, so beträgt der Druck auf den Kolben in dem größeren Cylinder, wenn dessen Durchmesser doppelt, die

Fläche also viermal so groß ist, 4 × 10 = 40 kg. Außerdem wird ein entsprechender Druck auf alle Wandungen ausgeübt.



98. Hydraulische Presse. Nach Frick.

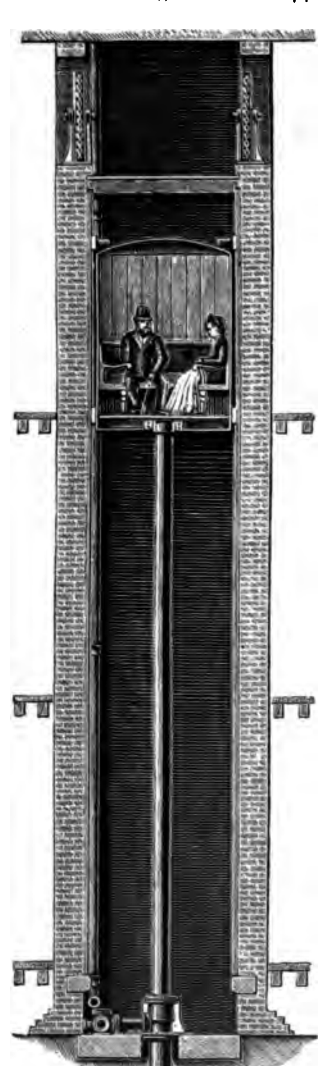
Auf dem Gesetze der ungeschwächten Fortpflanzung des Druckes beruht die am Ende des vorigen Jahrhunderts (1795) von Joseph Bramah in London erfundene hydraulische Presse. Abb. 97 stellt eine solche in einfachster Form schematisch im Schnitt, und Abb. 98 in der Ansicht dar. Von dem Hebel A B C wird durch die Kraft P mittels einer Pumpe mit Kolben K von geringem Querschnitt und dem Saugventil v_1 und Druckventil v_2 Wasser in dem Cylinder C unter den Kolben K_2 gedrückt. Der hier nach oben wirkende Druck ist also im Verhältnisse der Kolbenflächen größer, als der Druck auf K. Außerdem wird die am Hebelende A angreifende Kraft P schon nach dem Hebelgesetz im Verhältnisse der Hebelarme AC : BC vergrößert; sind also die beiden Kolbendurchmesser d und D, so ist der Druck auf $K_2 = P \cdot \frac{A\,C}{B\,C} \cdot \frac{D^2}{d^2}$. Durch die Wahl des Verhältnisses der beiden Kolbendurchmesser kann der Druck außerordentlich vergrößert werden; in demselben Verhältnis verlangsamt sich aber auch die Geschwindigkeit, mit welcher der Druckkolben steigt, und es bleibt wieder die Beziehung bestehen Kraft × Kraft-



99. Handpreßpumpe mit von der Hand ausrückbarer Füllpumpe.

weg = Last × Lastweg, d. h. in diesem Falle: das Produkt aus der auf den kleinen Kolben ausgeübten Kraft und der Hubhöhe desselben und der Anzahl der Hübe ist gleich dem auf dem Kolben K_2 ruhenden Gewichte multipliziert mit der Höhe, um welches dieses gehoben, oder gleich der Arbeit, welche auf andere Weise von dem Kolben verrichtet worden ist. Solche Arbeit ist z. B. das Aufpressen der Eisenbahnwagenräder auf die Achsen. Infolge der Eigenschaft der sehr geringen Zusammendrückbarkeit des Wassers braucht nur eine kleine Menge Wasser in ein schon ganz gefülltes Gefäß

(Preßcylinder u. s. w.) eingepreßt zu werden, um schnell einen hohen Druck zu erhalten; der Kolben der Preßpumpe kann also klein sein. Man kann mit Wasserpressung ohne Gefahr sehr hohe Drucke erzeugen, denn wenn wirklich ein Cylinder oder ein Rohr unter der Pressung reißt, so ist momentan der Druck verschwunden, da das Wasser keine Expansivkraft hat. Dies ist besonders für die Prüfung von Dampfkesseln wichtig. Würde man einen Kessel mit Dampf auf doppelten Betriebsdruck probieren und der Kessel platzte bei diesem Versuche, so würde die größte Zerstörung angerichtet; bei Wasserpressung dagegen wird nur aus der Bruchstelle einige Augenblicke ein Wasserstrahl herausschießen, ohne daß der Kessel in Stücken auseinander geschleudert wird. Der Erfinder verwendete diese Maschine als Packpresse für Heu, Flachs und Baumwolle, überhaupt zum Ersatz von Schraubenpressen, zur Erzeugung großen Druckes bei der Schießpulverfabrikation und seltsam genug als Metallhobel und Poliermaschine, sowie ferner zum Heben von Lasten statt der Kräne. In den hundert Jahren, die seitdem vergangen sind, besonders aber in den letzten fünfzig ist das Verwendungsgebiet der hydraulischen Presse geradezu ein unendliches geworden.



100. Direkt wirkender hydraulischer Aufzug.

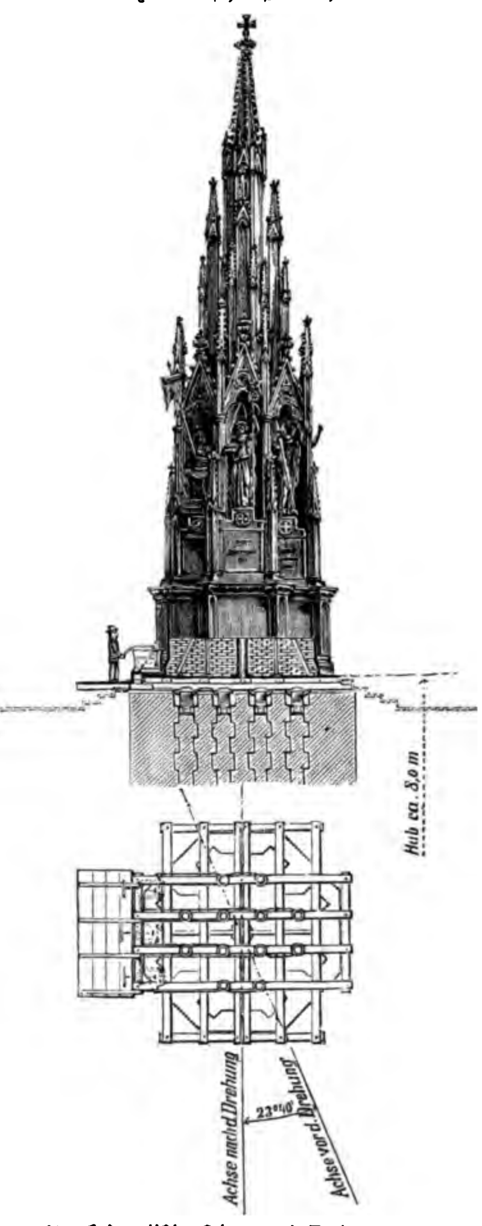
Die Druckpumpe braucht nicht mit dem Preßcylinder direkt verbunden zu sein; das Preßwasser kann vielmehr auch durch eine genügend widerstandsfähige Leitung auf beliebige Entfernung von der Pumpe nach dem Arbeitscylinder geleitet werden. Man kann von einer Preßpump- oder Kraftstation aus mehrere an verschiedenen entfernten Stellen befindliche hydraulische Druckmaschinen betreiben. Für kleinere Arbeitsleistungen werden Handpreßpumpen angewendet; eine solche zeigt Abb. 99. Das Wasser wird aus dem eisernen Behälter gesaugt; der kleinere Cylinder (links) ist der Preßcylinder, während die daneben stehende größere Pumpe dazu dient, das erforderliche Ersatzwasser in den Behälter zu pumpen. Sie wird bei Bedarf mit eingeschaltet und gleichzeitig mit der Preßpumpe betrieben. An dem linken Ende des Hebels wirkt der Arbeiter, während das Gegengewicht am anderen Ende das Aufwärtsbewegen des Hebels erleichtert, da man bekanntlich die größte Kraft beim Niederdrücken, dagegen weniger beim Heben ausüben kann. Von dem Preßcylinder aus geht nach links die Druckleitung ab.

Von den außerordentlich vielseitigen Anwendungen der hydraulischen Presse, also der Druckübertragung durch Wasser, seien hier noch einige Beispiele besprochen.

Am einfachsten sind die Anwendungen, bei denen durch den Druck eines Preßkolben direkt eine Arbeit geleistet werden soll, wie das erwähnte Aufdrücken von Eisenbahnrädern, oder eine Last gehoben werden soll. Letzteres Beispiel zeigt Abb. 100 bei einem direkt wirkenden Personenaufzuge, wie sie von der speziell in hydraulischen Anlagen weltberühmten Fabrik von C. Hoppe in Berlin ausgeführt werden und vielfach in größeren Geschäftshäusern, Fabriken, Hotels in Anwendung sind. In dem unten sichtbaren Preßcylinder, der von der unteren Flur aus so tief in den Boden versenkt ist, wie die Hubhöhe des Aufzuges beträgt, bewegt sich durch eine auf dem oberen Ende des Preßcylinders sitzende Stopfbüchse wasserdicht ein langer, genau glatt abgedrehter Kolben. Dieser trägt die Plattform des Aufzugskorbes; letzterer bewegt sich in einem gemauerten oder

gezimmerten Schacht senkrecht durch die verschiedenen Etagen des Gebäudes. Unten links ist die Preßwasserzuleitung sichtbar; das Preßwasser tritt bei geöffnetem Zuflußventil in den Zwischenraum zwischen Cylinder und Kolben — letzterer schließt nicht in der ganzen Länge des Cylinders an, sondern ist nur in der Stopfbüchse gedichtet — und drückt von unten gegen denselben. Je nach der Wasserpressung und dem Querschnitt des Kolbens kann auf diese Weise eine mehr oder weniger große Last gehoben werden. Die Bedienung ist natürlich sehr einfach, da sie nur beim Heben in dem Öffnen und Schließen des Druckventils besteht, während beim Niedergehen ein Abflußventil für das Druckwasser geöffnet wird.

Eine interessante Anwendung hydraulischer Hebung hat vor einigen Jahren bei dem Kriegerdenkmal auf dem Kreuzberg in Berlin stattgefunden. Dasselbe ist durch zwölf hydraulische Pressen um 8 m gehoben und gleichzeitig mit der Achse um etwa 24° gedreht worden. Von den Pressen waren drei Gruppen zu je vier zusammen verbunden, die voneinander unabhängig waren; durch genaue Beobachtung und Regulierung des Druckwasserzutritts zu den drei Gruppen wurde eine genau horizontale Lage während der Hebung eingehalten. Später ist der Hügel, auf dem das Denkmal steht, entsprechend erhöht und mit schönen Anlagen, besonders einem prächtigen Wasserfall, zu welchem das Wasser von einer besonderen, am Fuße des Berges liegenden Pumpstation gefördert wird, verschönert worden und bildet jetzt eine hervorragende Sehenswürdigkeit Berlins; von dem Fuße des Denkmals aus läßt sich das ganze imposante Häusermeer der großen Stadt übersehen.



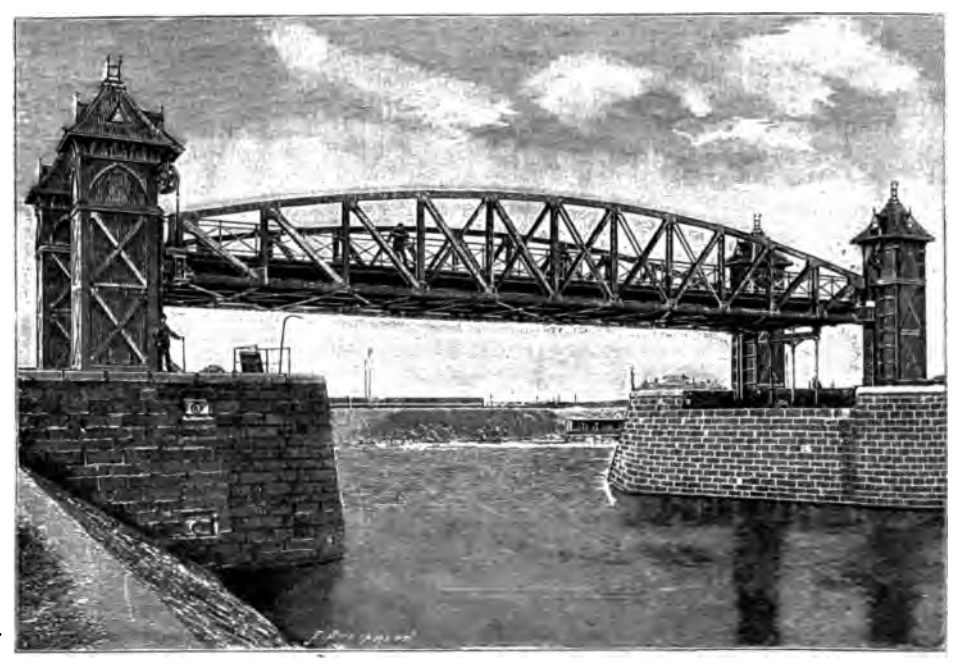
101. Hydraulische Hebung und Drehung des Kreuzberg-Denkmals.
Ausgeführt von C. Hoppe in Berlin.

In der Abb. 102 ist schließlich noch die Brücke mit hydraulischer Hebevorrichtung für die Einfahrt zu dem Hafen in Magdeburg-Neustadt dargestellt, deren hydraulische Anlage von derselben vorgenannten Firma ausgeführt ist. Die Brücke ruht auf zwei hydraulischen Hebekolben, deren je einer sich unter jedem Querträger an den Enden der Brücke befindet. Für die Durchfahrt von Schiffen werden diese beiden Kolben durch hydraulischen Druck genau gleichmäßig gehoben.

Über hydraulische Kraftübertragung im allgemeinen wird noch weiterhin im Schlußkapitel des III. Teiles dieses Bandes gesprochen.

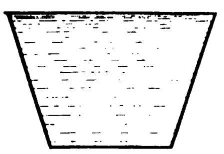
In einem offenen Gefäße übt das Wasser durch sein Gewicht einen Druck auf den Boden aus, welcher gleich ist dem Gewichte einer Wassersäule von dem Querschnitt des Bodens und der Höhe des Wasserspiegels; gleichzeitig wird ein Druck auf die Seitenwandungen ausgeübt, der für jeden Flächenteil gleich ist der Größe der Fläche multipliziert mit einer Wassersäule von der Höhe ihres Abstandes bis zur Oberfläche. Dieser hydro-

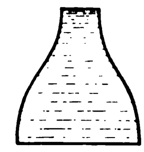
statische Druck ist ganz unabhängig von der Form und Größe des Gefäßes, er hängt nur ab von der Höhe der Wassersäule. Der Bodendruck, sowie die Seitendrucke in gleichen Höhen in den Gefäßen der beiden Abb. 103 und 104 ist vollständig gleich, obwohl das Gewicht des Wasserinhaltes sehr verschieden ist. Man kann also durch Anschluß einer engen hohen Röhre an ein geschlossenes Gefäß und Füllen dieser Röhre mit verhältnismäßig wenig Wasser einen großen inneren Druck auf das Gefäß ausüben, ähnlich wie bei der hydraulischen Presse. Will man aber versuchen, diesen ruhenden Druck in Arbeit, also Bewegung überzuführen, indem man an Stelle des an allen Seiten geschlossenen Gefäßes, einen Cylinder mit dichtschließendem Kolben setzt und den Druck auf den Kolben wirken läßt, so sieht man bald, daß diese Idee keinen Nutzen bringt, denn wenn der Kolben sich ein wenig unter dem Druck fortbewegt hat, so ist der geringe Wasserinhalt der engen hohen Röhre schon gebraucht, um den vom Kolben verlassenen Raum des Cylinders einzunehmen, und der Druck ist hierdurch verschwunden.



102. Hubbrücke mit hydraulischer Hebevorrichtung für die Einfahrt des Hafens in Magdeburg-Neustadt. Ausgeführt von C. Hoppe in Berlin.

Die Heber. Wie weiterhin noch näher besprochen wird, übt die Luft auf alle Körper von allen Seiten einen gewissen Druck aus; derselbe beträgt 1,03 kg oder, wie gewöhnlich gesagt wird, rund 1 kg auf einen Quadratzentimeter. Der Atmosphärendruck hält also einer Wassersäule von 10 m Höhe das Gleichgewicht, da diese ebenfalls auf 1 qcm Fläche einen Druck von 1 kg ausübt (1000 cm × 1 qcm = 1000 cbcm = 1 kg). Wird nun in einer Röhre, deren unteres Ende in Wasser taucht, eine Luftleere, oder auch nur eine Luftverdünnung erzeugt, so wird durch den Überdruck der Luft auf der übrigen Wasserfläche Wasser in der Röhre in die Höhe gedrückt, oder wie man auch sagt, das Vakuum saugt Wasser an. Bei vollständiger Luftleere würde das Wasser 10 m hoch steigen.



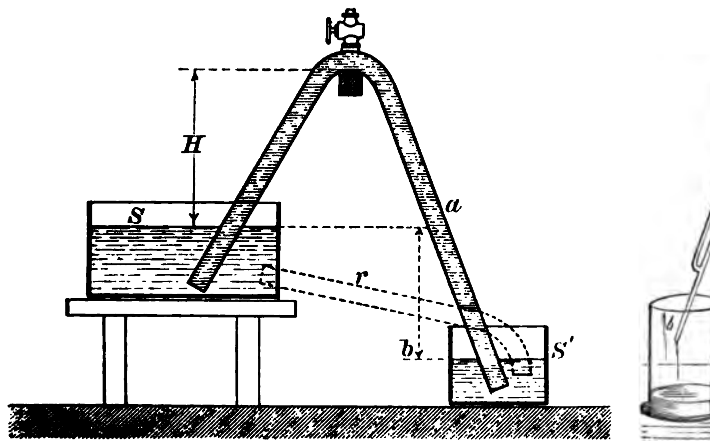


103 u. 104. Hydrostatischer Druck.

Hierauf beruht der Stechheber (Abb. 105). Derselbe ist ein längliches, oben und unten offenes Gefäß; steckt man dasselbe in eine Flüssigkeit, schließt die obere Öffnung mit dem Daumen und hebt dann das Gefäß heraus, so bleibt die Flüssigkeit in demselben.

Ein kleiner Teil fließt beim Herausheben gleich zurück, dadurch wird die darüber befindliche Luft verdünnt, und das Vakuum hält die übrige Flüssigkeit fest. Lüftet man den Daumen von der oberen Öffnung, so fließt unten so viel aus, wie man oben Luft einläßt. Wird in einem gebogenen Rohre oder zweischenkeligen Heber (Abb. 106), dessen einer Schenkel in einer Flüssigkeit steht, während der andere längere heraushängt, eine Luftverdünnung erzeugt, z. B. durch Ansaugen an einem auf dem Scheitel angebrachten Hähnchen, so steigt die Flüssigkeit zuerst bis zum Scheitel und fließt dann nach dem anderen Schenkel über. Hat dies einmal begonnen, so fließt die Flüssigkeit ununterbrochen weiter, bis der Wasserspiegel in dem Gefäße auf die Höhe des unteren Heberschenkels gesunken ist, oder, wenn dieser tiefer liegt, als der Boden des Gefäßes, bis der Heber nicht mehr in die Flüssigkeit eintaucht. Der Abfluß erfolgt in derselben Weise, mit derselben Geschwindigkeit, wie durch das ebenso weite punktierte Rohr r. Der obere Teil des Hebers vom Wasserspiegel bis a ist für sich allein im Gleichgewicht; die darunter in den längeren Heberschenkel hängende Wassersäule zieht das andere Wasser nach. Die Höhe H kann theoretisch bis 10 m betragen, doch steigt in Wirklichkeit die Flüssigkeit nicht so hoch, da man eine völlige Luftleere mit den gewöhnlichen Mitteln, z. B. durch Ansaugen, nicht erzeugen kann. Je tiefer das Heberende

105. Stechheber.



106. Zweischenkeliger Saugheber.



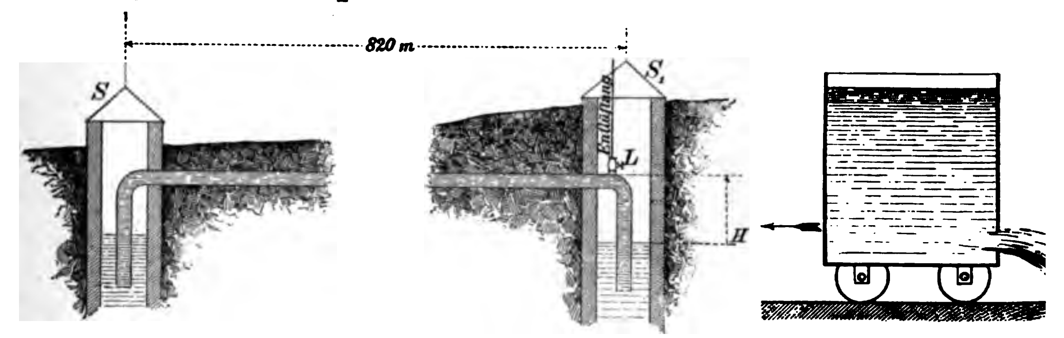
107. Saugheber mit besonderer Saugröhre.

unter dem Wasserspiegel S liegt, desto schneller fließt das Wasser über; taucht aber auch der untere Heberschenkel in Wasser, wie in der Abbildung, so ist nicht mehr sein Endpunkt, sondern der Wasserspiegel S', also die Differenz von S und S', a b maßgebend.

Abb. 107 zeigt noch einen Saugheber, wie er zum Überfüllen von Flüssigkeiten aus Gefäßen vielfach verwendet wird, mit einem besonderen seitlichen Röhrchen zum Ansaugen. Es ist nicht nur unbequem, zum Ingangsetzen eines gewöhnlichen einfachen Hebers an dem unteren Ende zu saugen, sondern bei manchen Flüssigkeiten, wie Petroleum, Öl u. s. w. auch unappetitlich. Bei der Vorrichtung Abb. 107 hält man das untere Ende des Hebers mit dem Finger zu, oder man steckt es in Wasser und saugt dann oben an dem Saugrohr, bis Flüssigkeit aus dem oberen Gefäße A von a nach b übertritt.

Die Heberwirkung wird in der verschiedensten Weise angewendet, z. B. zum Überfüllen des Inhalts von Fässern, wobei man den einen Heberschenkel in das Spundloch steckt. Eine wichtige Anwendung findet der Heber vielfach bei Wasserwerken, um Wasser von einem Brunnen nach einem tieferliegenden Pumpenschachte zu führen, wenn eine direkte Rohrleitung mit Gefälle nicht möglich ist. Bei dem städtischen Wasserwerke zu Kiel z. B. ist eine Heberleitung von über 800 m Länge in Betrieb; es wird hier das Wasser aus einer Anzahl Röhrenbrunnen in dem gemauerten Sammelbrunnen S gesammelt, und bei dem 800 m entfernt liegenden Pumpwerke ist ein zweiter, tieferer Sammel-

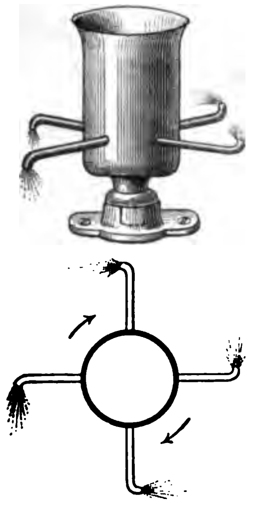
brunnen S_1 ausgeführt, aus welchem die Pumpmaschinen das Wasser saugen. Eine direkte Leitung zwischen beiden Brunnenschächten hätte sehr tief im Grundwasser ausgeführt werden müssen. Man hat deshalb die Leitung nach dem Heberprinzip ausgeführt und in bequemer Tiefe in den Boden gelegt. An dem höchsten Punkte des Hebers wird die Luft durch das Entlüftungsventil L angesaugt, und das Wasser fließt kontinuierlich nach dem Pumpenschachte. Die Leitung besteht aus 50 cm weiten eisernen Röhren und kann täglich bis zu 15 000 cbm Wasser oder über 10 000 Liter pro Minute liefern. Solche Heberleitungen müssen allerdings außerordentlich sorgfältig dicht hergestellt werden. Bei einer undichten Stelle fließt nicht, wie sonst bei Wasserleitungen, Wasser aus, sondern es saugt sich Luft ein, da ja in der Leitung Vakuum herrscht. Die eingesaugte Luft würde sich am höchsten Punkte sammeln, die Luftverdünnung nimmt mehr und mehr ab, bis der äußere atmosphärische Überdruck nicht mehr genügt, um der Wasserhöhe H das Gleichgewicht zu halten, worauf die Leitung aufhört, zu funktionieren; der Heber reißt ab, wie man sich ausdrückt, d. h. der Zusammenhang des Wassers wird unterbrochen und ein Teil fließt aus dem einen, der andere aus dem anderen Heberschenkel aus. Selbst wenn die Leitung völlig dicht ist, sammelt sich doch allmählich Luft an, welche sich aus dem Wasser selbst



108. Heberleitung (Kieler Wasserwerk). 109. Reaktion ausfließenden Wassers.

ausscheidet; es muß deshalb für andauernde Entlüftung vom höchsten Punkte des Hebers bei L aus gesorgt werden, zu welchem Zwecke dieser mit der Luftpumpe der Dampfmaschine in Verbindung gesetzt wird.

Der hydraulische Rückstoß. In einem mit Wasser gefüllten Gefäße mit ringsum geschlossener Seitenwand findet Gleichgewicht statt, da der hydraulische Druck auf die Wände nach allen Seiten gleichmäßig wirkt. Wird aber an einer Stelle in der Seitenwand eine Öffnung gemacht, so wird hier der Druck aufgehoben, das Wasser strömt aus. Hierdurch ist auf der entgegengesetzten Seite ein Überdruck vorhanden, welcher das Gefäß in der dem ausströmenden Wasser entgegengesetzten Richtung fortzubewegen sucht. Dieser Antrieb wird der Rückstoß oder die Reaktion des ausfließenden Wasserstrahles genannt. Ist das Gefäß leicht beweglich, z. B. auf Rollen gesetzt, so wird es fortrollen (Abb. 109). Das bekannte Segnersche Wasserrad beruht auf dieser Erscheinung (Abb. 110). Ein Wassergefäß hat unten vier im Kreuze stehende horizontale Rohransätze, die alle am Ende in derselben Richtung umgebogen sind, so daß die Ausflußöffnungen in einem zum Mittelpunkte des Gefäßes konzentrischen Kreise liegen. Das ganze Gefäß ist um seinen Mittelpunkt auf einem vertikalen Zapfen drehbar. Die Reaktion der Wasserstrahlen drückt auf die Ausflußröhren, so daß das ganze Gefäß sich in der Richtung, wie die Pfeile andeuten, dreht. Angewendet wird dieses Prinzip für Rasensprenger, welche mit der Druckwasserleitung in Verbindung



110 Segners Wasserrad.

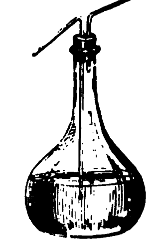
gesetzt werden. Eine wichtige Anwendung findet statt bei den **Reaktionsturbinen**, die später unter den Kraftmaschinen zur Besprechung kommen.

Fließendes Wasser. Springende Wasserstrahlen. Nach dem Gesetze der kommunizierenden Röhren müßte das Wasser in einer Rohrleitung, die von einem hochgelegenen Wasserbassin ausgeht, ebenso hoch steigen, wie der Spiegel des Bassins liegt. Dies gilt aber nur für die Ruhe. Ist das Wasser in der Rohrleitung in Bewegung, strömt also an einer Stelle Wasser aus, so findet ein Druckverlust statt; je größer die ausfließende Wassermenge und damit die Wassergeschwindigkeit in der Leitung ist, desto kleiner wird der Druck, bis derselbe gleich 0 wird. Der Druckverlust rührt von der Reibung des Wassers an den Rohrwänden her, hängt also außer von der Geschwindigkeit der Bewegung, von der Beschaffenheit der inneren Rohrwand ab. Wenn Wasser unter Druck steht, z. B. unter dem Wasserdruck von einem höheren Behälter aus, so hat es beim Ausfluß eine gewisse Geschwindigkeit, die von der Druckhöhe und der Größe und Form der Ausflußöffnung abhängt. Ist der Ausfluß nach oben gerichtet, so steigt das Wasser in einem Strahle in die Höhe. Die Strahlhöhe ist stets geringer als die Druckhöhe, also z. B. die Höhe des Wasserbehälters, von dem aus die Leitung gespeist wird.



111. Springbrunnen.

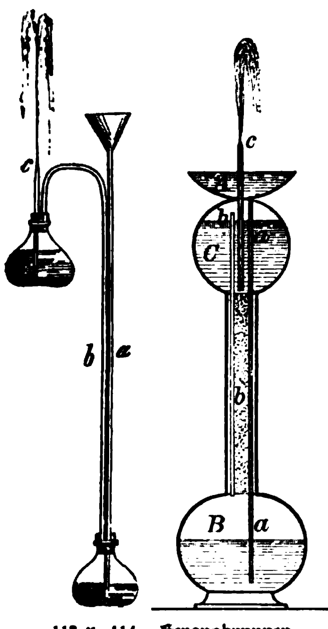
Der Druck kann natürlich auch auf andere Weise erzeugt werden, durch Druck eines Kolbens auf eine in einem Cylinder eingeschlossene Wassermenge (Feuerspritze) oder durch verdichtete Luft. Mit letzterer arbeitet der Heronsball und der Heronsbrunnen, welche dem griechischen Gelehrten Heron vom alexandrinischen Museum (etwa 100 v. Chr.) zugeschrieben werden, wahrscheinlich wohl mit Unrecht von späteren Schriftstellern, da beide Erfindungen etwas jünger sind. Eine moderne Anwendung des Heronsballes ist die **Spritzflasche** (Abb. 112), wie sie allgemein in Laboratorien verwendet wird. Die Flasche ist durch einen dichtschließenden Kork- oder besser Gummipfropfen verschlossen, durch welchen zwei gebogene Glasröhren mit einem Schenkel hindurchgehen; die eine geht nur eben durch den Pfropfen, die andere reicht bis nahe zum Boden der Flasche. Wenn man durch Einblasen in erstere die Luft über dem Wasser verdichtet, so wird durch den Luftdruck in dem anderen Röhrchen das Wasser hochgedrückt und spritzt aus der Spitze desselben hinaus. Den Heronsbrunnen stellen die Abb. 113 und 114 in verschiedener Anordnung dar. Die heberförmige Röhre b (Abb. 113) geht luftdicht durch die Stopfen zweier Flaschen, in die untere bis nahe zum Boden, in die obere nur eben durch den Stopfen. In der oberen Flasche steckt außerdem noch das Röhrchen c, welches oben zu einer Spitze mit feiner Öffnung ausgezogen ist, und in das untere Gefäß ist eine recht hohe Röhre a eingesteckt. Wird diese durch die trichterförmige Erweiterung bis oben hin mit Wasser gefüllt, so wird durch den Druck dieser Wassersäule die Luft in dem Gefäße verdichtet; dieselbe drückt durch das Rohr b auf das Wasser in dem oberen Gefäße, welches hierdurch aus dem Röhrchen c in feinem Strahle herausgetrieben wird. Die zweite Anordnung (Abb. 114) ist kompendiöser und praktischer; hier sind beide Gefäße vereinigt.



112. Spritzflasche.

In die obere Schale A wird Wasser eingegossen, dasselbe steht durch die Röhre a mit der untersten Ausbauchung B des Apparates in Verbindung, komprimiert also die Luft in diesem, so daß dieselbe durch die Röhre b in den mittleren Ballon C auf das in diesem befindliche Wasser drückt, welches hierdurch aus dem Röhrchen c hinausgetrieben wird. Die beiden Verengungen zwischen den drei Gefäßen müssen natürlich dichte Verschlüsse haben, durch welche die Röhren a und b hindurchgehen. Auf der Wirkung dieser Heronsbrunnen beruhen die hübschen selbstthätigen Zimmerspringbrunnen, welche inmitten eines Blattpflanzen-Arrangements einen schönen Zimmerschmuck bilden.

Wasserstoß. Wie jede in Bewegung befindliche Masse, so besitzt auch bewegtes Wasser eine bestimmte Energie oder lebendige Kraft, deren Größe von der Menge und der Geschwindigkeit des Wassers abhängt. Diese lebendige Kraft kann in mechanische Arbeitsleistung umgewandelt werden, indem man sie auf andere Körper übertragen läßt. Trifft ein Wasserstrahl auf eine feste Fläche, so übt derselbe den hydraulischen Stoß aus; im eigentlichen Sinne des Wortes findet kein Stoß statt, denn es tritt keine plötzliche Geschwindigkeitsänderung ein. Je nach der Form der Fläche wird der Wasserstrahl in verschiedener Weise abgelenkt und überträgt hierbei seine Energie auf die Fläche, welche dadurch in Bewegung gesetzt werden kann. Hierauf beruhen die unter den Kraftmaschinen zu besprechenden unterschlägigen Wasserräder und die Aktionsturbinen. Eine direkte Ausnutzung der lebendigen Kraft fließenden Wassers durch Stoßwirkung findet bei dem Stoßheber oder hydraulischen Widder statt. Dieser interessante Apparat wurde 1797 von dem Mechaniker Montgolfier in St. Cloud bei Paris erfunden. Dieser beobachtete an der Wasserleitung in einer Badeanstalt, daß durch schnelles Schließen eines starkfließenden Wasserhahnes die ganze Rohrleitung einen starken Schlag erhielt. Er fand, daß das Wasser durch diesen Schlag in einem Rohre hoch in die Höhe getrieben werden konnte, höher als dem Wasserdrucke in der Ruhe entspricht, also über den Spiegel des Bassins hinaus, von dem aus die Leitung gespeist wurde.



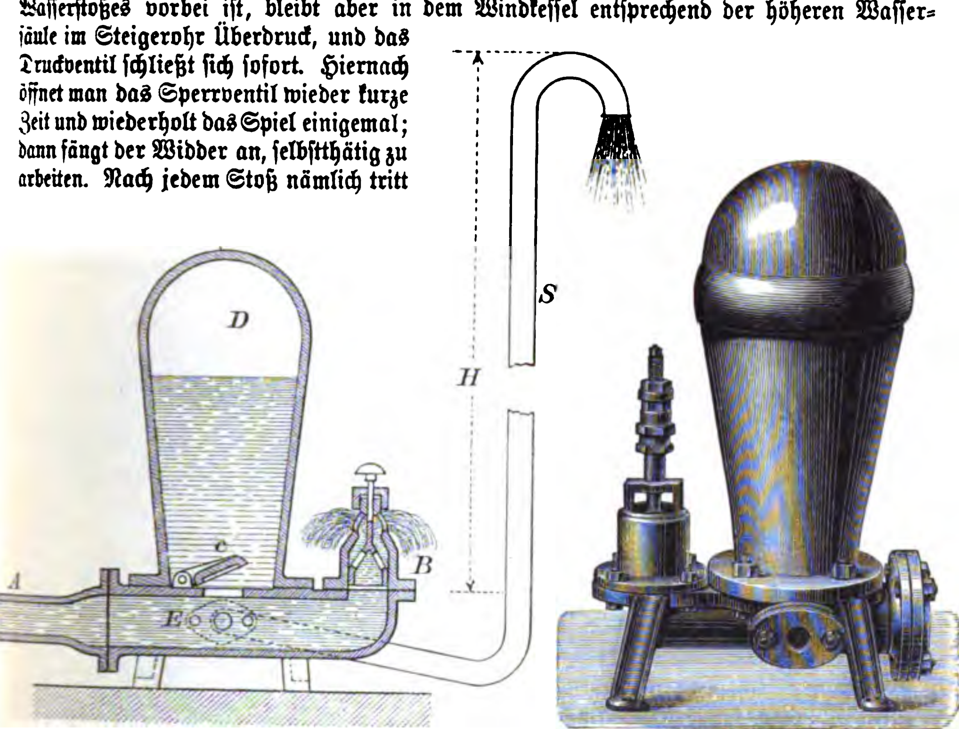
113 u. 114. Heronsbrunnen.

Durch solche Schläge in Wasserleitungen können leicht die Röhren zersprengt werden, wenn dieselben auch auf den doppelten Betriebsdruck geprüft waren; bei städtischen Wasserleitungen sind deshalb fast allgemein solche Verschlußvorrichtungen vorgeschrieben, welche nicht mit einem Ruck geschlossen werden können, nämlich Niederschraubventilhähne anstatt der einfachen Konushähne. Große gußeiserne Straßenhauptleitungen können durch zu schnelles Schließen eines Hauptschiebers zertrümmert werden. Die bei solchen Schlägen auftretenden Drucke können gar nicht rechnerisch vorher bestimmt werden; sie können bis 15, 20 und mehr Atmosphären betragen, wenn der normale Druck nur $^1/_3$ davon beträgt.

Obige Beobachtung führte Montgolfier zur Konstruktion seines hydraulischen „Widders“. Derselbe dient zur Förderung kleinerer Wassermengen auf größere Höhen mittels größerer Wassermengen mit kleinerem Druck.

In den Abb. 115 u. 116 ist derselbe in der jetzt üblichen Form und Konstruktion dargestellt. Aus einem höher gelegenen Behälter fließt das Betriebswasser durch die Leitung A dem Apparat zu. B ist das Sperr- oder Stoßventil mit frei hängendem Ventilteller, welcher also ohne inneren Druck durch sein Gewicht offen ist. Das Betriebswasser drückt zunächst dieses Ventil von unten her zu, öffnet das Druckventil c zwischen der Leitung und dem Windkessel D und steigt in letzteren. Der Windkessel hat seitlich einen Rohrstutzen E, an welchen das Steigrohr S anschließt. Das Betriebswasser steigt in diesem zunächst nach dem Gesetze der kommunizierenden Röhren bis auf die Höhe des

Betriebswasserspiegels; dann tritt Gleichgewicht ein, und das Druckventil c schließt sich durch sein Gewicht. Öffnet man jetzt durch Niederdrücken das Stoßventil B, so fließt das Wasser aus der Betriebsleitung hier aus; dieses Ventil muß einen großen Querschnitt haben, um viel Wasser durchzulassen, so daß in der ganzen Zuleitung das Wasser in schnelle Bewegung kommt. Nach wenigen Augenblicken läßt man das Ventil los; das strömende Wasser schlägt dasselbe sofort nach oben zu, und im selben Augenblicke übt das Wasser vermöge seiner lebendigen Kraft einen Stoß auf sämtliche Teile der Leitung aus. Unter diesem hydraulischen Stoße öffnet sich das Druckventil c, das Wasser tritt mit ziemlicher Heftigkeit in den Windkessel, so daß in diesem die Luft komprimiert wird und so das Wasser in dem Steigrohr in die Höhe getrieben wird. Sobald die Wirkung des Wasserstoßes vorbei ist, bleibt aber in dem Windkessel entsprechend der höheren Wassersäule im Steigerohr Überdruck, und das Druckventil schließt sich sofort. Hiernach öffnet man das Sperrventil wieder kurze Zeit und wiederholt das Spiel einigemal; dann fängt der Widder an, selbstthätig zu arbeiten. Nach jedem Stoß nämlich tritt



115 u. 116. Hydraulischer Widder.

beim Zuschlagen des Druckventiles in der Betriebswasserleitung eine momentane Druckverminderung ein, und in diesem Augenblicke fällt der Teller des Sperrventils unter seinem eigenen Gewichte nieder und öffnet das Ventil, aus dem das Betriebswasser gleich darauf wieder ausströmt, bis die Geschwindigkeit so groß ist, daß es wieder von dem Wasser zugedrückt wird. Auf diese Weise wiederholt sich das Spiel in regelmäßigen, kurzen Perioden, ohne aufzuhören, der Widder arbeitet also selbstthätig und kontinuierlich. Durch die komprimierte Luft im Windkessel D werden die einzelnen Stöße des eintretenden Wassers aufgefangen und ausgeglichen, so daß das Wasser im Steigerohr nicht stoßweise, sondern kontinuierlich unter diesem Drucke steigt und oben ausfließt. Um den Widder außer Betrieb zu setzen, wird das Sperrventil eine kurze Zeit mit der Hand geschlossen gehalten, bis die Wassermenge in der Betriebsleitung in Ruhe gekommen ist. Die in die Höhe geförderte Wassermenge ist stets bedeutend kleiner als die Betriebswassermenge, besonders wenn die Förderhöhe viel größer ist als die Druckhöhe des Betriebswassers. Dies liegt auf der Hand, denn die größere Förderhöhe kann nur durch die größere Betriebswassermenge erzielt werden. Unter den günstigsten Umständen, besonders bei ziemlicher Druckhöhe des Betriebswassers und nicht sehr bedeutender Förderhöhe, kann der Nutzeffekt bis etwa 70 % betragen, gewöhnlich ist er aber viel geringer.

Bei längerem Arbeiten des Widders, besonders bei hohem Gefälle des Betriebswassers, wird die Luft im Windkessel allmählich von dem geförderten Wasser mitgerissen; da aber ein gewisser Inhalt komprimierter Luft für das regelmäßige Funktionieren notwendig ist, so muß auf Ersatz derselben Bedacht genommen werden. Zu diesem Zwecke hat die Betriebsleitung vor dem Windkessel ein kleines Loch; für gewöhnlich spritzt aus demselben Wasser aus, in dem kurzen Augenblicke der erwähnten Druckentlastung nach jedem Stoße aber wird eine kleine Menge Luft eingesaugt, welche sich mit dem Wasser mischt und beim nächsten Stoße zum Teil in den Windkessel gedrückt wird. Der hydraulische Widder kann überall da angewendet werden, wo ein kostenloses Wassergefälle mit genügender Wassermenge aus einer Quelle, einem Bache oder Teiche zur Verfügung steht. Das Wasser muß rein sein, da ja ein Teil davon selbst zur Benutzung kommen soll; bei schmutzigem Wasser versagt der Apparat auch leicht, wenn die Ventile nicht dicht schließen. Da der Apparat keiner Wartung bedarf, so ist er ein recht einfaches und



117. Anwendung des hydraulischen Widders.

billiges Mittel (abgesehen von der Anlage der Rohrleitungen) zur Wasserversorgung einzeln gelegener Wohnhäuser, Villen, ländlicher Gutshöfe und unter günstigen Umständen auch für kleine Gemeinden zur Speisung von Laufbrunnen, sowie schließlich auch für Springbrunnen und Bewässerungsanlagen. Er findet zu diesen Zwecken seit langer Zeit vielfach Anwendung; für größere Wassermengen kann er allerdings nicht in Betracht kommen.

Die Wasserhebungsmaschinen und Feuerspritzen.

Seit den ältesten Zeiten hat sich das Bedürfnis nach Vorrichtungen zum Heben von Wasser aus den Flüssen geltend gemacht und zwar nicht allein für den Hausbedarf, sondern bei den vorwiegend ackerbautreibenden Völkern auch zur Landbewässerung. Schon mehrere tausend Jahre vor unserer Zeitrechnung besaßen Babylon, Ägypten, Indien umfangreiche Bewässerungsanlagen, welche allerdings nur zum Teil mit künstlichen Hebewerken versehen waren. Solche bestanden hauptsächlich in ausgedehntem Maße in Ägypten in derselben Form, wie man sie noch heute überall am Nil bei den Fellachen beobachten

kann; in der Abb. 118 ist eine solche ägyptische Wasserschöpfvorrichtung, eine Sâkije, dargestellt. Über ein hölzernes, um eine horizontale Achse sich drehendes Rad läuft in einer Schleife ein endloses Seil, das eine Anzahl Thonkrüge trägt; die Trommel wird durch einen im Kreise gehenden Büffel mittels zweier primitiver, ineinander greifender hölzernen Räder gedreht, auf der einen Seite senken sich die Krüge mit dem offenen Ende nach unten in das Wasser, füllen sich hier und steigen dann in umgekehrter Lage, die Öffnung nach oben, in die Höhe; oben gießen sie ihren Inhalt in ein Gerinne und sinken dann an der anderen Seite der Trommel wieder zum Wasser hinab.



118. Sâkije (Ägyptisches Schöpfrad).

Diese alte Vorrichtung ist immerhin schon ein Fortschritt gegen den Ziehbrunnen, der wohl die älteste und einfachste Form der Wasserhebevorrichtungen darstellt, wenn man von dem direkten Schöpfen mit Gefäßen absieht. Derselbe ist in seiner uralten Form noch heute vielfach auf dem Lande in Gebrauch; wenn das Wasser im Brunnen in größerer Tiefe steht, so daß man es auch mittels eines längeren zweiarmigen Hebels (Abb. 119) nicht erreichen kann, dann wird auf den Brunnen eine Kurbelwelle gesetzt und der Eimer an einer Kette hinabgelassen und heraufgehaspelt. Eine andere alte Vorrichtung ist das Wasserschöpfrad, das auch heute noch verwendet und besonders in der holländischen Tiefebene noch vielfach zur Entwässerung gebraucht wird. Es stellt ein umgekehrtes Wasserrad dar; anstatt daß das Wasser in den Schaufeln das Rad zur Umdrehung bringt und so Arbeit leistet, wird durch äußere Kraft das Wasser durch die Radschaufeln gehoben und in Gerinne ausgegossen, in denen es über die Absperrungsdeiche fortläuft. In manchen Gegenden Hollands sieht man Dutzende von Windmühlen, die zu diesem Zwecke Wasserschöpfräder betreiben.

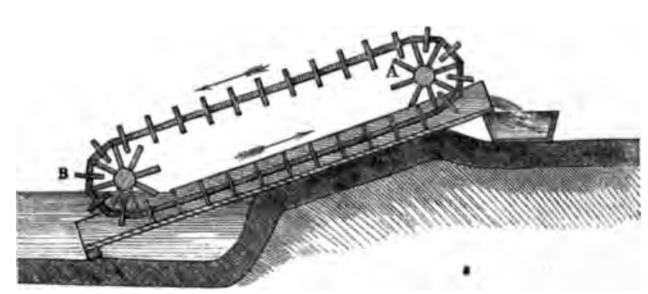


119. Ziehbrunnen.

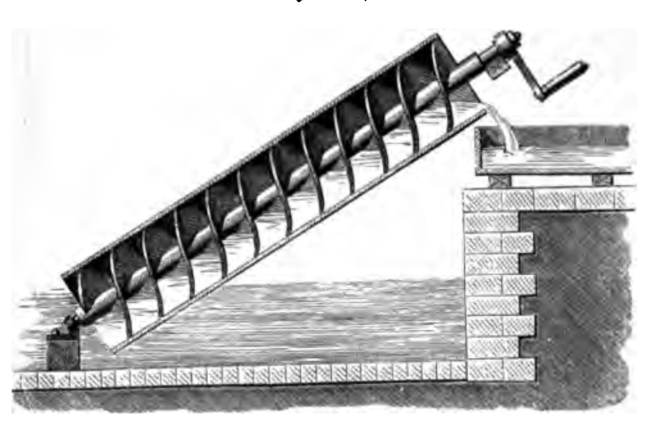
Sehr alt sind auch die sogenannten Paternosterwerke zum Wasserschöpfen; Abb. 120 stellt ein solches in einfachster Form dar. Um zwei Speichenkränze A und B läuft eine Kette oder ein bewegliches Band, welches mit einer Anzahl rechtwinkeliger Brettchen besetzt ist; letztere passen genau in eine schräge, gehobelte Holzrinne. Das Rad A wird mittels Kurbel gedreht, und die Brettchen ziehen das Wasser die schräge Rinne hinauf, aus welcher es oben in ein vorgelegtes Gerinne ausläuft.

Eine bessere Vorrichtung ist die Wasserschnecke oder Archimedische Schraube, welche in Abb. 121 im Schnitt dargestellt ist. In einer beiderseits offenen, schrägen

Röhre sitzt ein Schraubengang, an der Innenwand dicht anschließend; die Achse ist an zwei Punkten drehbar gelagert. Wird durch die Kurbel am oberen Ende die Schraube in entgegengesetzter Richtung ihrer Windung gedreht, so wird das bei jeder Drehung an der untersten Windung eintretende Wasser durch die Schraubengänge allmählich nach oben gehoben, bis es an dem oberen offenen Ende der Röhre ausfließt. Solche Wasserschnecken werden noch jetzt bei Gelegenheiten angewendet, wo ohne große Einrichtungen für kürzere Zeit Baugruben wasserfrei gehalten werden sollen, z. B. bei Kanalbauten oder Fundierungen. Die Förderhöhe ist an sich unbegrenzt und hängt nur von der konstruktiven Möglichkeit der Länge der Schraube ab.

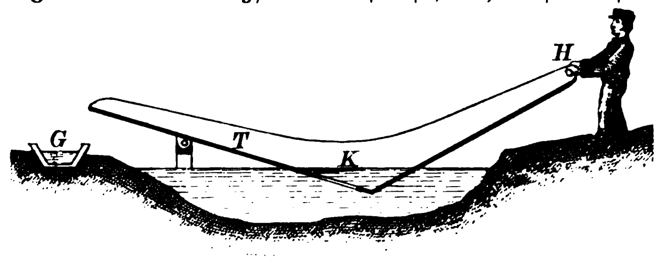


120. Paternosterwerk.


121. Wasserschnecke.

Eine sehr einfache Schöpfvorrichtung ist noch der Hebetrog (Abb. 122), der aber nur dann benutzt werden kann, wenn das Wasser auf ganz geringe Höhe gehoben werden soll. Der Trog T wird an dem Handgriff H auf- und abgewippt; beim Eintauchen in das Wasser öffnet sich die Klappe K im Boden, durch welche das Wasser eintritt, beim Heben aber schließt sie sich, und das Wasser fließt, nachdem der Trog entsprechend gehoben ist, über den Boden nach dem Gerinne G ab.

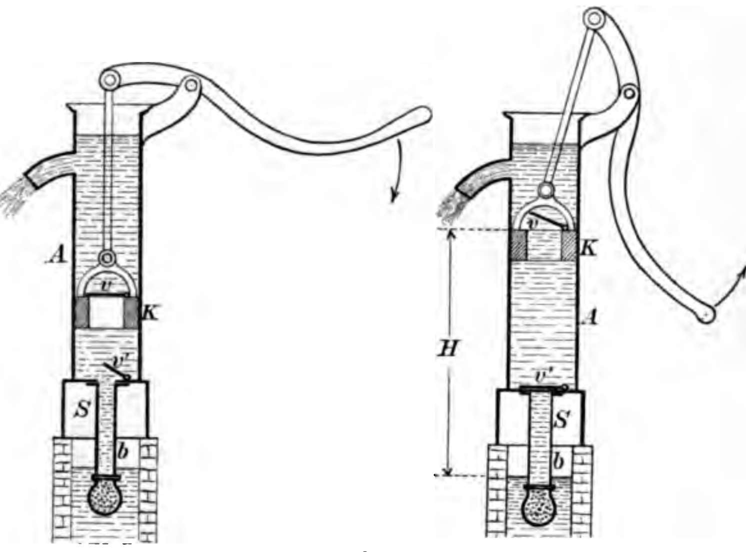
Verbreiteter und wichtiger als diese nur unter gewissen Umständen brauchbaren Wasserhebevorrichtungen sind die Pumpen. Saugpumpen waren schon zu Aristoteles' Zeiten in Anwendung; die Druckpumpe, nach demselben Prinzip, wie die jetzige, mit einem Saug- und einem Druckventil ist wahrscheinlich gegen 100 v. Chr. von Ktesibios, einem Gelehrten des Alexandrinischen Museums, erfunden worden. Zu Kaiser Augustus' Zeiten waren die Kolbenpumpen allgemein in Anwendung, wie wir aus den Berichten des Baumeisters des Augustus, Vitruv, schließen können.



122. Wasserschöpfwippe (Hebetrog).

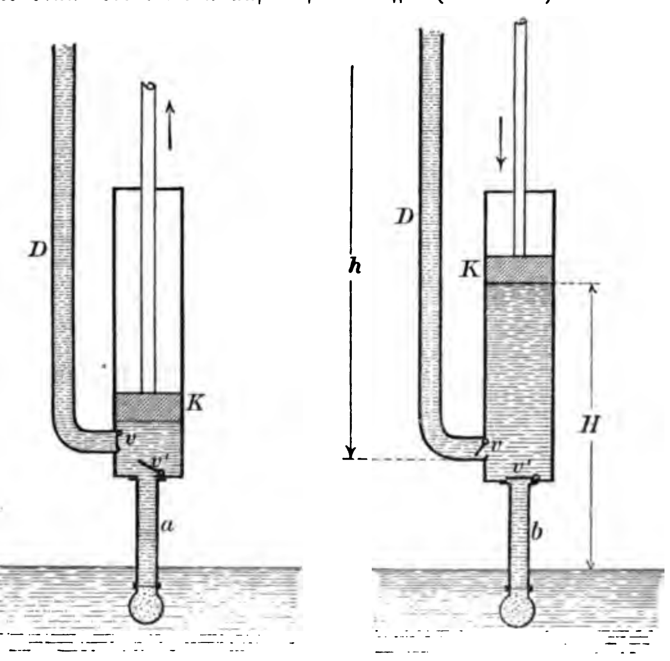
Das Prinzip der Kolbenpumpen ist sehr einfach. In den Abb. 123 u. 124 ist die gewöhnliche Saug- oder Hebepumpe in der einfachsten Form schematisch dargestellt. Wir haben schon bei den Hebern gesehen, daß durch den äußeren Luftdruck Wasser in einem luftleeren Raum bis etwa 10 m hoch gedrückt wird, oder bei Luftverdünnung entsprechend weniger hoch. In dem Pumpenstiefel A bewegt sich möglichst dicht der ringförmige Kolben K, derselbe hat eine nach oben leicht drehbare Ventilklappe v;

je nachdem gegen diese von unten oder von oben gedrückt wird, öffnet oder schließt dieselbe den Kolben. Eine ebensolche Ventilklappe v' ist am unteren Ende des Pumpenstiefels angebracht, hier schließt das Saugrohr S an, welches mit dem Saugkorb (Sieb) in den Brunnen b taucht. Durch den Schwengel wird der Kolben in dem Pumpenstiefel in bekannter Weise auf und ab bewegt. In der Stellung bei Abb. 123 ist der Kolben im Anfang der Aufwärtsbewegung begriffen, das Kolbenventil v ist durch seine Schwere und den äußeren Luftdruck geschlossen; unter dem Kolben entsteht ein luftverdünnter Raum, und durch den äußeren Luftdruck A steigt also das Wasser aus dem Brunnen durch das Steigrohr in den Pumpenstiefel bis unter den Kolben.



123 u. 124. Saugpumpe.

Beim Hubwechsel drückt der Kolben auf dieses Wasser (Abb. 124). Die Klappe v' im Pumpenstiefel schließt sich, dagegen öffnet sich das Kolbenventil v, und das Wasser steigt durch dieses über den Kolben. Wird nun der Kolben wieder gehoben, so verdrängt er dieses Wasser, welches zum Ausguß ausströmt, während vom Saugrohr neues Wasser durch das untere Ventil in den Stiefel tritt. Die größte Förderhöhe H hängt hiernach nur von der Saughöhe ab, die theoretisch etwa 10 m beträgt; in Wirklichkeit aber, da ein vollkommen luftdichtes Arbeiten des Kolbens und der Ventile nicht möglich ist, beträgt die Hubhöhe 6—7 m. Wird H größer, so steigt das Wasser nicht mehr bis unter den Kolben, oder überhaupt nicht mehr bis an den Pumpenstiefel; der Kolben bewegt sich also nur in dem luftverdünnten Raum über dem Wasserspiegel.

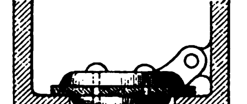


125 u. 126. Saug- und Druckpumpe.

Um Wasser auf größere Höhe zu fördern, dient die **Druckpumpe**, welche nach demselben Prinzip, nur in etwas anderer Anordnung konstruiert ist, wie die Abb. 125 u. 126

zeigen. Hier hat der Kolben kein Ventil, sondern ein solches ist im Druckwassersteigrohr D angebracht. Beim Aufwärtsgehen des Kolbens (Abb. 125) hebt sich wieder das Saugventil v' am Saugrohr, während das Druckventil v unter dem Druck der darüber stehenden Wassersäule im Steigrohr geschlossen ist. Beim Niedergehen schließt sich v', das Wasser wird vom Kolben durch das sich öffnende Druckventil v in das Steigrohr gedrückt; sobald die Kolbenbewegung aufhört oder umkehrt, schließt sich das Druckventil. Der Pumpenstiefel ist hierdurch beim Saughub vollständig von dem Druckrohr und beim Druckhube von dem Saugrohr abgeschlossen; die Druckhöhe h ist hierdurch unbegrenzt, während natürlich für die Saughöhe H dasselbe gilt, wie für gewöhnliche Saugpumpen.

Die gewöhnlichen Kolbenpumpen arbeiten beim Saugen besser, wenn der Pumpenstiefel mit Wasser angefüllt ist, als wenn derselbe leer ist und zuerst Wasser angesaugt werden muß, denn die Dichtung des Kolbens an der Cylinderwand ist bei Wasser leichter als bei Luft. Manche nicht sehr sorgfältig ausgeführte Pumpen und besonders solche mit Ledermanschettendichten saugen gar nicht an, wenn sie einige Zeit trocken gestanden haben. Man muß dann erst von oben Wasser eingießen, damit der Kolben im Wasser arbeitet, ehe sie ansaugen; dies ist z. B. meist bei den gewöhnlichen Baupumpen der Fall, wenn sie eine Zeit lang nicht gebraucht worden sind. Es ist deshalb stets gut, wenn das Saugventil dicht schließt, so daß das Wasser über demselben im Pumpenstiefel stehen bleibt, wenn die Pumpe nicht benutzt wird.


127. Ventilklappe.

Ehe wir zur Beschreibung einiger wichtigeren Pumpenkonstruktionen übergehen, seien noch kurz die verschiedenen Arten der einfacheren gebräuchlichen Ventile besprochen.

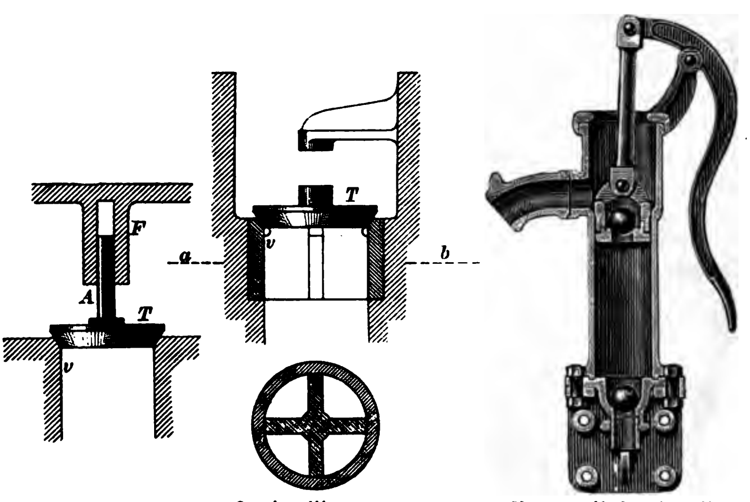
Die älteste bei den gewöhnlichen Hauspumpen meist gebräuchliche Form ist die Ventilklappe; dieselbe wird als Saugventil, Druckventil, sowie besonders auch als sogenanntes Fußventil angewandt. Letztere werden an dem untersten Ende von Saugrohren befestigt; sie schließen sich, wenn die Pumpe aufhört zu arbeiten, und das im Saugrohr enthaltene Wasser bleibt also in demselben stehen, wodurch das Wiederansaugen beim Pumpen erleichtert wird. Meist sind solche Fußventile auch mit einem Saugkorb d. h. einem metallenen Sieb versehen, um etwaige in dem Wasser enthaltene gröbere Unreinigkeiten der Pumpe fern zu halten. Die Klappenventile bestehen aus einer leicht beweglichen Scheibe, welche sich dicht auf einen glatt gedrehten Rand, den Ventilteller auflegt. Die Dichtung geschieht durch Leder, auch wohl durch vulkanisierten Gummi, indem eine Scheibe hiervon so zwischen zwei Metallscheiben befestigt wird, daß rings herum ein Rand vorsteht, der sich auf den Ventilsitz auflegt; die Ventilsitze sind bei besseren Pumpen aus Messing oder Rotguß hergestellt, da dieses länger seine glatten Flächen behält, als Gußeisen. In der einfachsten Anordnung wird die Klappe an einem Lederstreifen befestigt, bei besserer Arbeit aber mittels der oberen Metallscheibe an einem Scharnier, wie in Abb. 127. Große Klappenventile schlagen durch ihr Gewicht, sowie den Wasserdruck beim Schließen heftig auf ihre Sitze, besonders wenn sie sich ziemlich hoch öffnen; um dies zu vermeiden, wendet man auch statt einer runden zwei halbrunde Klappen an, welche mit ihren Scharnieren an einem Stege des Ventilgehäuses sitzen, der den Querschnitt des letzteren in zwei Hälften teilt.

Direkt metallische Dichtung findet bei den Kegelventilen statt; einen wirklichen Kegel bilden dieselben meist nicht, der sogenannte Kegel ist ein Teller T mit konischer Dichtungsfläche, die in eine genau entsprechende Ausdrehung des Ventilsitzes v paßt (Abb. 128 und 129). Solche Ventile werden vorzugsweise aus Messing (oder Rotguß oder Bronze) hergestellt; sie müssen sehr sorgfältig gearbeitet sein und können nur bei reinem Wasser gebraucht werden, denn sobald ein Sandkorn zwischen Kegel und Sitz kommt, dichtet das Ventil nicht. Der Teller bewegt sich senkrecht auf und ab und muß in irgend einer Weise eine Führung und eine Hubbegrenzung haben; in Abb. 128 geschieht beides durch einen Bolzen A, der durch eine Führungshülse F geht, welche an dem Ventildeckel angegossen ist. Eine bessere Führung, besonders für größere Ventile ist die in Abb. 129 angedeutete: an den Ventilkegel sind nach unten Rippen angegossen, welche gerade in das Ventil hineingehen, und die Hubbegrenzung geschieht durch eine im Ventilgehäuse über dem Kegel angegossene Nase.

Schließlich sind noch die Kugelventile zu erwähnen, bei welchen sich eine genau rund abgedrehte Kugel in einen entsprechend ausgedrehten Sitz legt; Abb. 130 zeigt eine Handpumpe mit Kugelventilen für Teer, Jauche und andere dicke Flüssigkeiten oder verunreinigtes, schlammiges Wasser.

Dieses sind nur die Grundformen der gebräuchlichen Pumpenventile, bei größeren Ausführungen werden noch sehr verschiedene andere Konstruktionen angewendet; bei den Ringventilen z. B. liegen in einem größeren Ventilgehäuse in einem Ringe eine Anzahl kleiner,

einzelner Ventile angeordnet. Bei **Etagenventilen** bauen sich mehrere solcher Ringe etagenförmig übereinander derart, daß in der Mitte ein kleiner Ring zu oberst liegt, darunter seitlich ein Ring mit größerem Durchmesser u. s. w.; statt der kleinen Einzelventile kann auch bei Etagenventilen jeder Ring aus einem einzigen ringförmigen Ventil bestehen. **Doppelsitzventile** haben zwei Ventile übereinander so angeordnet, daß der Druck des Wassers oder Dampfes u. s. w. bei dem einen Ventilkegel auf Schließen, beim anderen auf Öffnen wirkt; beide Drucke heben sich annähernd auf, so daß ein solches sogenanntes „entlastetes" Doppelsitzventil leicht geöffnet werden kann, während bei einem gewöhnlichen größeren Ventile bei großem, einseitigem Druck das Öffnen schwierig ist.

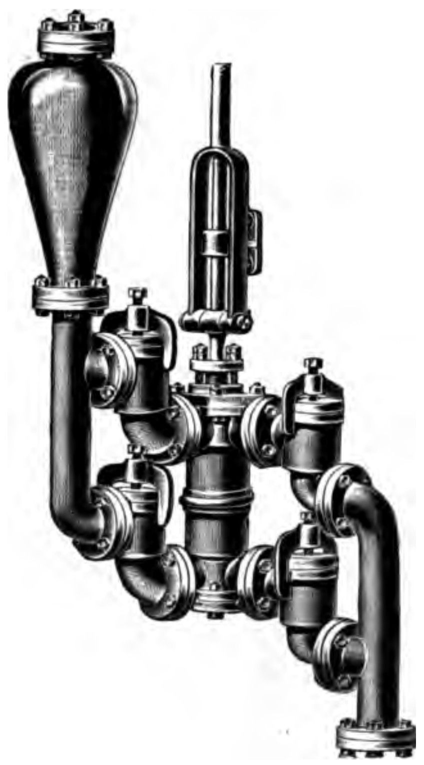


128 u. 129. Kegelventile. 130. Pumpe mit Kugelventilen.

Bei der beschriebenen Grundtype der Druckpumpe erfolgt die Wasserförderung immer nur während des Niederganges des Kolbens; das Wasser fließt aus dem Druckrohr mit Unterbrechungen aus. Man kann einen regelmäßigeren Ausfluß und damit auch einen ruhigeren Gang der Pumpe erzielen durch Einschaltung eines Windkessels in das Druckrohr. In diesem wird im oberen Teile Luft komprimiert, die als elastisches Kissen wirkt, einen Teil des Druckes des eingepreßten Wassers aufnimmt und während der umgekehrten Kolbenrichtung wieder abgibt; das Wasser schwankt hierdurch im Windkessel gleichmäßig im Tempo der Kolbenhübe auf und ab, und aus dem Steigrohre fließt es kontinuierlich aus. Durch Einschaltung eines solchen Windkessels wird indessen die aufzuwendende Kraft beim Auf- und Niedergange des Kolbens nicht gleichmäßig gemacht; dies wird erreicht durch die **doppeltwirkenden Pumpen**. Die einfachste Anordnung einer solchen besteht in der Verbindung zweier Pumpenstiefel; während in dem einen der Kolben aufgeht, bewegt er sich in dem anderen nieder. Die gewöhnlichen Baupumpen (Saugpumpen) sind so angeordnet: beide Pumpenstiefel sind an ein gemeinschaftliches Saugrohr angeschlossen und haben über dem Kolben Anschluß nach dem gemeinschaftlichen Ausguß (Abb. 131). Diese Pumpen haben eine sehr große Leistungsfähigkeit und


131. Baupumpe.

dienen allgemein zum Auspumpen von Baugruben, Brunnen u. s. w. bis 6—7 m Tiefe. In ähnlicher Weise können auch zwei Druckpumpen zu einer doppeltwirkenden verbunden werden. Die beiden Cylinder werden hierbei häufig übereinander gesetzt und von einer Kolbenstange betrieben. Aber auch mit einem einzigen Cylinder kann eine Kolbenpumpe doppeltwirkend gemacht werden, wie die Abb. 132 zeigt. Das Saugrohr teilt sich (rechts in der Zeichnung) in zwei Zweige, die mit je einem Saugventil unten und oben an den Pumpenstiefel angeschlossen sind; ebenso ist letzterer durch zwei Stutzen links mit je einem Druckventil an das Steigrohr und den Druckwindkessel angeschlossen. Bewegt sich der Kolben nach oben, so saugt er unter sich aus dem unteren Saugventil Wasser an; gleichzeitig aber drückt er das über ihm im Cylinder stehende Wasser durch das obere Druckventil in den Windkessel, das obere Saugventil und untere Druckventil sind geschlossen. Beim Niedergange schließen sich jene beiden sofort, und es öffnen sich das obere Saugventil, durch welches Wasser von oben in den Stiefel eintritt, und das untere Druckventil, durch welches das beim vorigen Hube angesaugte Wasser fortgedrückt wird. Von dem Windkessel aus geht die Druckleitung, welche in der Zeichnung nicht sichtbar ist.



132. Doppeltwirkende Saug- und Druckpumpe.

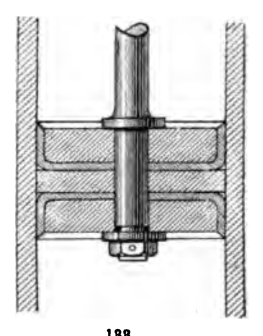
Wie aus dieser Abbildung ersichtlich ist, werden die Pumpenventile (abgesehen von Hauspumpen oder einfachen Saugpumpen) meist besonders für sich seitlich angebracht, nicht im oder am Pumpengehäuse selbst. Bei großen Pumpen werden neben dem Pumpenstiefel besondere Ventilkästen aufgestellt, in denen das Saugventil und Druckventil untergebracht sind; zwischen beiden ist der Pumpenstiefel angeschlossen, während unter dem Saugventil der Saugrohranschluß und über dem Druckventil der Druckrohranschluß sich befinden.

Für die gute Wirksamkeit einer Pumpe ist das Dichthalten der Ventile und des **Kolbens** in erster Linie von Wichtigkeit. Zur Dichtung der Kolben dient die Liderung; Abb. 133 zeigt einen Kolben mit Lederliderung. Runde Scheiben aus recht weichem Leder werden zu sogenannten Manschetten gepreßt, d. h. am Rande umgebogen, und in der Mitte an dem Kolben befestigt; das weiche, etwas elastische Leder legt sich dicht an die Innenwand des Pumpencylinders an, so daß sich der Kolben annähernd luftdicht in demselben bewegt. Nicht so gut, aber bequemer und für Hauspumpen noch üblich ist die Umwickelung des Kolbens mit getalgten Hanfzöpfen.

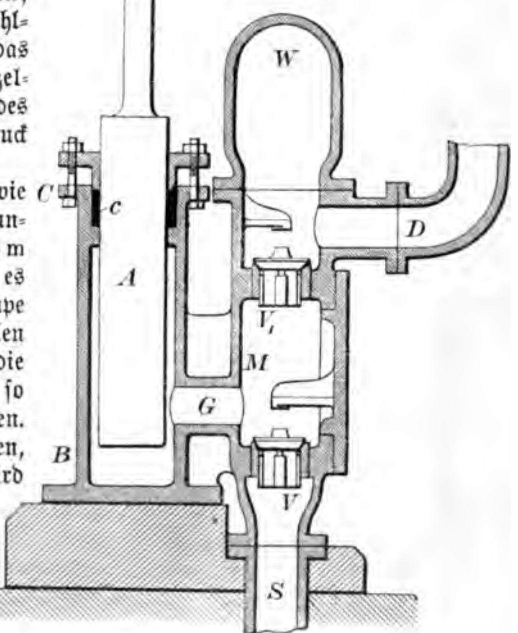
Man hat schließlich auch noch Kolben mit Metallliderung, welche aus elastischen Ringen besteht, die in entsprechende Nuten des Kolbens eingelegt werden; dieselben kommen ziemlich wenig zur Anwendung, da sie sich schnell abnutzen, nicht bequem repariert werden können und im ganzen gegen Lederliderung keinen Vorteil bieten.

Dagegen werden an Stelle scheibenförmiger geliderter Kolben überhaupt vorteilhaft und für größere Pumpen immer mehr die Taucherkolben oder Plunger angewendet; dieselben bestehen aus einem langen, runden, massiven oder hohlen Cylinder, welcher sich, ohne an den Wänden anzuschließen, in dem Pumpencylinder bewegt. Die Abdichtung geschieht nur am Deckel des Pumpenstiefels in gewöhnlicher Weise mittels Stopfbüchse. Es ist offenbar nicht notwendig, daß der Plunger in dem Pumpenstiefel dicht schließend sich bewegt, wenn nur unter Abschluß gegen die äußere Luft bei jedem Auf- und Abgang ein bestimmtes Volumen des Cylinderinhalts freigegeben (also die Luft ent-

sprechend verdünnt, bezw. Wasser angesaugt) oder eingenommen (also verdrängt) wird. Eine einfachwirkende Plungerpumpe mit nebenanliegendem besonderen Ventilkasten ist in Abb. 134 dargestellt; der Plunger A bewegt sich frei, ohne anzuschließen, in dem Cylinder B und ist nur oben in der Stopfbüchse C mit der Liderung c dicht geführt. Der Pumpenstiefel ist mit dem Ventilgehäuse M bei G verbunden. V ist das Saugventil, V_1 das Druckventil, S der Saugrohranschluß, D das Druckrohr, W der Windkessel. Es ist leicht einzusehen, daß solche Plunger leichter dicht zu halten sind, als andere Kolben, denn die Stopfbüchse ist stets sichtbar und kann nach Bedarf angezogen oder in kurzer Zeit neu verpackt werden. Der Pumpencylinder braucht gar nicht ausgedreht zu werden, sondern kann rauh bleiben; nur der Plunger selbst muß sauber gedreht sein.


133. Kolben mit Lederliderung.

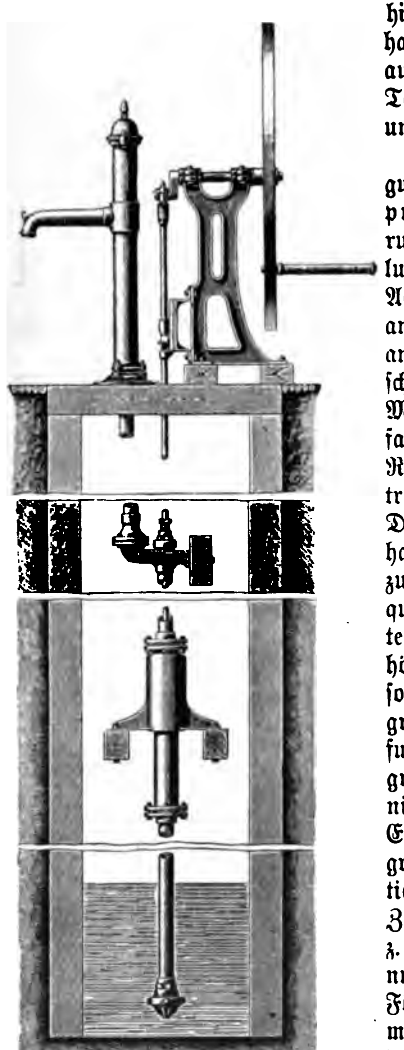
Bei allen Kolben- und Plungerpumpen ist die Druckhöhe theoretisch unbegrenzt; in Wirklichkeit wird eine Grenze dadurch gezogen, daß bei steigender Förderhöhe der Druck der Wassersäule in dem unteren Teile des Druckrohres immer stärker wird, bis die Grenze der Materialfestigkeit der Röhren erreicht wird. Gußeiserne Röhren von der gewöhnlichen Wandstärke halten etwa 8—10 Atmosphären inneren Druck aus, entsprechend 80—100 m Wassersäule. Für höhere Wassersäulen werden Röhren mit besonders starker Wandung und besonderer Art der Flanschenverbindung hergestellt. Aber auch dies hat seine Grenzen. Bei sehr großen Förderhöhen, z. B. aus der tiefsten Sohle von Bergwerken, aus 800 m und mehr Tiefe, kann das Wasser nicht mehr mit einem Male in die Höhe gepumpt werden; für solchen Wasserdruck würden die besten Stahlröhren nicht ausreichen. Man pumpt dann das Wasser in mehreren Abteilungen mittels einzelner sogenannter Drucksätze in die Höhe. Jedes Stück der Steigleitung hat dann nur den Druck von dem nächst höheren Drucksatze her.



134. Plungerpumpe.

Bezüglich der Saughöhen ist man, wie schon dargelegt, an viel engere Grenzen gebunden. Wenn das Wasser in einem Brunnen 8 m oder tiefer unter Terrain steht, dann kann es mit einer auf Terrainhöhe stehenden Pumpe nicht mehr gepumpt werden. In solchen Fällen muß die Pumpe tiefer gestellt und damit die Saughöhe verringert werden; man erhält so die **Schachtpumpen** oder Tiefbrunnenpumpen. Die Pumpen selbst sind genau wie die anderen, nur ihre Aufstellung in einem Schacht wird schwieriger, ebenso ihr Betrieb, indem der Kolben durch ein Gestänge bewegt werden muß. Bei nicht zu großer Tiefe kann man sich helfen, indem man den Pumpencylinder tiefer hängt, an dem Pumpenständer ein Steigrohr befestigt, welches in genügender Tiefe den Pumpenstiefel trägt. Die vom Schwengel bewegte Kolbenstange geht in dem Steigrohr hinunter bis zu dem Kolben im Cylinder. Wird die Tiefe aber größer, über 15 bis 18 m, wie dies in Städten mit niedrigem Grundwasserstand und häufig in Schlössern, die auf Hügeln stehen, vorkommt, so muß eine Druckpumpe in den Brunnenschacht eingebaut werden; Abb. 135 zeigt ein solches Pumpwerk für Tiefbrunnen bis zu 24 m Tiefe. Bei solcher Förderhöhe ist es nicht mehr möglich, wie bei gewöhnlichen

Pumpen, mit einem einfachen Schwengel zu arbeiten, da die bei jedem Hube zu leistende Arbeit zu groß wird. Die ganze Wassersäule vom Brunnenspiegel ab soll bei einem Hube um die Hubhöhe gehoben werden, oder, was dasselbe ist, die bei jedem Hube gepumpte Wassermenge muß auf die ganze Höhe gefördert werden. Es müssen deshalb andere Vorrichtungen zur Anwendung kommen. In der Abbildung besteht das Pumpwerk aus einem Kurbelrad auf eisernem Bocke; von einer kleinen Kurbel wird das in den Brunnen hinabgehende Gestänge betrieben. Die Pumpe ist innerhalb der bequemen Saughöhe über dem Wasserspiegel auf Balken montiert; das Steigrohr umgibt im unteren Teile das Gestänge, oben geht es mit Kniestück zur Seite und schließt an den Fuß eines Auslaufständers an.



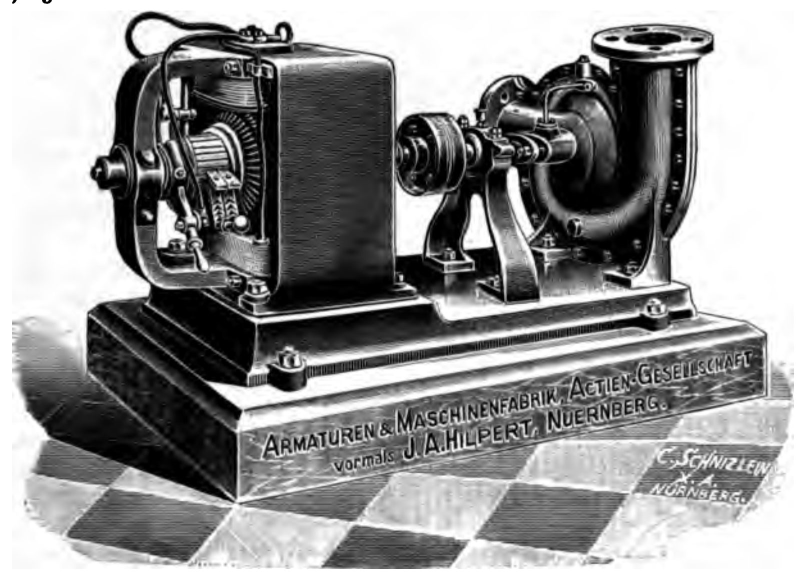
135. Tiefpumpe.

Für manche Verwendungszwecke eignen sich sehr gut an Stelle der Kolbenpumpen die Zentrifugalpumpen. Dieselben bestehen aus einem gußeisernen runden Gehäuse, in dem um eine mittels Stopfbüchsen luftdicht durch die Seitenwände durchgeführte zentrale Achse ein Flügelrad rotiert, welches möglichst genau an den Seitenwänden und dem Umfang des Gehäuses anschließt. Der Wassereintritt (Sauganschluß) geschieht von beiden Seiten oder einseitig achsial in der Mitte des Gehäuses, der Austritt tangential am Umfang des Gehäuses. Durch die schnelle Rotation des Rades wird das von der Achse her in das Gehäuse tretende Wasser an den Umfang gedrängt und aus dem Druckrohrstutzen hinausgedrückt. Zentrifugalpumpen haben gar keine Ventile, sind sehr leicht aufzustellen, zu betreiben und zu bedienen und besitzen eine große quantitative Leistungsfähigkeit; sie arbeiten aber vorteilhaft nur bei verhältnismäßig geringen Förderhöhen, bis zu etwa 8 m Druckhöhe. Die Saughöhe soll nicht über 4 m betragen; wird die Förderhöhe größer, so sinkt der Nutzeffekt beträchtlich. Die Zentrifugalpumpen eignen sich deshalb zur Bewältigung großer Wassermassen mit geringer Förderhöhe, bei nicht dauernden Anlagen, z. B. bei Wasserbauten zum Entwässern von Baugruben, als Hilfspumpen für größere Pumpwerke, um den Hochdruckpumpen aus tieferen Sammelbrunnen das Wasser zuzuführen. Eine Zentrifugalpumpe für ziemlich bedeutende Leistung, z. B. 600 cbm stündliche Wasserförderung, beansprucht nur einen sehr kleinen Raum und braucht bei geringer Förderhöhe nur eine kleine schnellaufende Dampfmaschine zum Antrieb, während eine Kolbenpumpe von derselben Leistung schon große Dimensionen hat, bedeutend größere und stärkere Fundamente beansprucht und ganz bedeutend mehr kostet. Zentrifugalpumpen laufen mit großer Umdrehungszahl, bis über 2000 Touren pro Minute; es eignet sich deshalb der Betrieb durch Elektromotoren, indem sie direkt mit der Welle des Motors gekuppelt und auf derselben Grundplatte montiert werden (Abb. 136).

Zentrifugalpumpen vermögen nicht selbst Wasser anzusaugen; zur Inbetriebsetzung muß die ganze Saugleitung und das Pumpengehäuse selbst vorher mit Wasser angefüllt werden. Dies kann geschehen durch Absaugen der Luft vom höchsten Punkte der Pumpe, aus einer zu diesem Zwecke vorgesehenen Entlüftungs- oder Füllschraube, mittels eines noch später zu besprechenden Ejektors (Luftsaugers), worauf das Wasser im Saugrohr

nachsteigt, oder durch direktes Anfüllen mit Wasser; im letzteren Falle muß natürlich die Saugleitung mit einem Fußventil versehen sein, damit das Wasser nicht unten auslaufen kann, was übrigens bei allen Pumpen vorteilhaft ist. Da die Zentrifugalpumpen keine Ventile haben, so eignen sie sich besonders zur Förderung von verunreinigtem, schlammigem, sandigem Wasser, wie es z. B. bei Kanalbauten oder Fundierungsarbeiten gepumpt werden muß.

Ähnlich den Zentrifugalpumpen sind die Kreiselpumpen, welche besonders als Tiefpumpen zum Auspumpen oder Entsanden von Brunnen gebraucht werden. Sie werden an dem Steigrohre bis in das Wasser hinabgelassen; durch eine senkrechte Welle wird ein horizontales Rad mit schraubenartigen Flügeln in einem am unteren Ende des Steigrohrs sitzenden Gehäuse in sehr schnelle Drehung versetzt, wodurch das Wasser in die Höhe gedrückt wird.

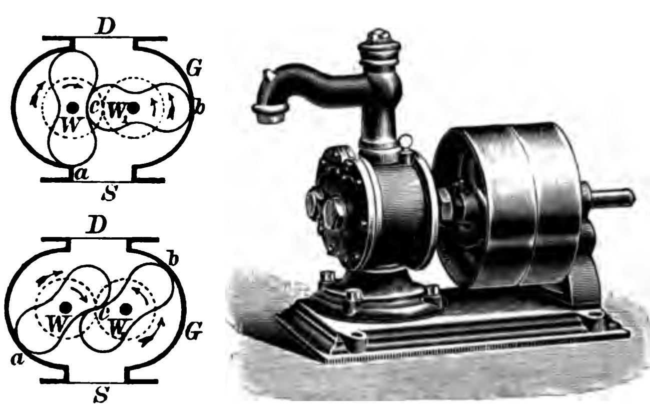


136. Zentrifugalpumpe mit Elektromotorbetrieb.

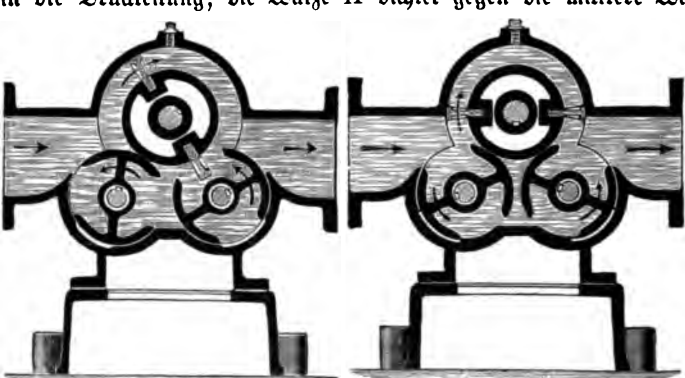
Eine andere Art rotierender Pumpen sind die Kapsel- oder Zahnradpumpen. In einem Gehäuse G drehen sich um zwei luftdicht durch die Seitenwände hindurchgeführte Wellen zwei eigentümlich geformte Körper W und W^1 in entgegengesetzter Richtung, welche derart ineinander eingreifen (s. Abb. 137 und 138), daß sie in jeder Lage einerseits gegen das Gehäuse, anderseits gegeneinander dicht abschließen. In der ersten Figur tritt vom Saugstutzen S aus Wasser in den Raum zwischen den Rotationskörpern und der Gehäusewand; auf der Druckseite wird Wasser durch die beiden sich gegeneinander bewegenden Körper nach dem Druckrohranschluß D gepreßt. Die Saug- und Druckseite des Gehäuses sind vollständig voneinander getrennt, da die beiden rotierenden Körper bei a und b an dem Gehäuse, bei c aneinander dicht anliegen. Beim Fortschreiten der Drehung schließt in der Lage der zweiten Figur eine Seite des Körpers W einen Teil des angesaugten Wassers ab, indem er unten die Gehäusewand bei a erreicht, und drückt dieses Wasser vor sich her nach D, während das Wasser vom Saugstutzen in den Raum zwischen W_1 und der rechtsseitigen Gehäusewand tritt. Es findet also ohne Ventile eine kontinuierliche Wasserförderung statt. Das nach oben fortgedrückte Wasser muß aus der Saugleitung nachsteigen. Eine derartige rotierende Pumpe mit Antrieb durch Riemenscheiben zeigt Abb. 139. Zur Ingangsetzung müssen auch diese Pumpen angefüllt werden.

Auf ähnlichem Prinzip beruht auch die Walzenpumpe System Klein (von Klein, Schanzlin & Becker, Frankenthal, Pfalz), welche manche Vorzüge vor andern rotierenden

Pumpen besitzt. Die Wirkungsweise derselben ist aus den Querschnitten Abb. 140 und 141 ersichtlich, welche die Rotationskörper in zwei aufeinanderfolgenden Lagen zeigen. Links ist der Saug-, rechts der Druckstutzen; die obere Walze dreht sich durch äußeren Antrieb — in der Ansicht Abb. 142 z. B. durch Riemenantrieb — in der Pfeilrichtung und trägt zwei gegenüberstehende Flügel, die in dem ausgedrehten oberen Gehäuse fast dicht schließend laufen. Die beiden unteren Walzen haben genau denselben Durchmesser wie die obere, und sie wälzen sich in derselben Umfangsrichtung (also im entgegengesetzten Drehsinne, wie die Pfeile zeigen) dicht auf der ersteren; unten rechts und links laufen sie dicht in den ausgedrehten Teilen des Gehäuses. Beide untere Walzen haben je zwei gegenüberliegende Ausschnitte, durch welche bei der Rotation die Flügel der oberen Walze frei durchschlagen. In jeder Lage der drei Walzen zu einander ist der rechte Teil vom linken Teil des Gehäuses abgedichtet, oben durch einen Flügel der oberen Walze, in der Mitte und unten durch eine der beiden unteren Walzen, von denen immer eine gegen die obere Walze anliegt und die andere gegen das untere Gehäuse abdichtet. Verfolgen wir den Gang der drei Walzen und bezeichnen die obere mit I, die untere links mit II, die rechts mit III. In der Lage Abb. 140 drückt der obere Flügel das Wasser von links nach rechts in die Druckleitung; die Walze II dichtet gegen die mittlere Walze, und III gegen die untere Gehäusewand. Der eine Flügel der oberen Walze bewegt sich gerade durch den Ausschnitt der Walze III, in der darauf folgenden Lage tritt der Flügel zwischen beide unteren Walzen; beide liegen gegen Walze I dicht an, und Walze II dichtet nach unten. Bei der weiteren Drehung tritt der Flügel in die Öffnung der Walze II, es tritt also die umgekehrte Lage, wie bei der ersten Figur ein. In dieser ganzen Zeit strömt von links Wasser in das obere Gehäuse nach, bis der obere Flügel die halbrunde Gehäusewand rechts verläßt, während der gegenüberliegende Flügel wieder links dasselbe Spiel fortsetzt (Abb. 141). Da die Walzen nicht aufeinander schleifen, sondern mit genau gleicher Umfangsgeschwindigkeit aufeinander rollen oder wälzen, so findet wenig Reibung und Kraftverlust statt. Da diese Pumpe keine Ventile hat, so ist sie besonders geeignet für unreine, schlammige, dicke Flüssigkeiten.



137 u. 138. Kapselpumpe. 139. Kapselpumpe.



140 u. 141. Kleine Walzenpumpe (Querschnitte).

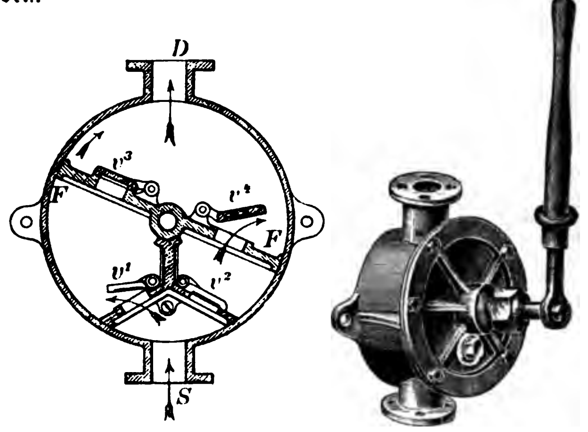
Sehr beliebt sind in letzter Zeit noch für kleinere Wassermengen, wie für den Hausbedarf, Badezimmer, Stallungen, Gärten, sowie auch zum Entleeren oder Auffüllen von Bier, Wein, Petroleumfässern u. s. w. die Flügelpumpen geworden. Abb. 143 zeigt

die Wirkungsweise derselben im Schnitt, Abb. 144 gibt eine Ansicht. Sie besteht aus einem flachen, runden, eisernen oder metallenen Gehäuse, welches unten einen Saugrohr- und oben einen Druckrohranschlußstutzen hat. Über ersterem sitzen nach oben schlagende Klappenventile v^1 und v^2; auf einer durch die Mitte des Gehäuses gehenden und in der Wandung desselben abgedichteten Welle sitzt der Flügel F F, welcher durch einen außen auf der Welle sitzenden Schwengel oscillierend rechts und links gedreht wird und dicht an der Innenwand des Gehäuses anschließt. Auf jeder Seite des Flügels sitzt ein Klappenventil (v^3 und v^4), und die Wirkungsweise ist jetzt leicht erkennbar: v^1 und v^2 sind Saugventile, v^3 und v^4 Druckventile; dreht sich der Flügel, wie in der Abbildung, nach rechts, so tritt durch v^1 Wasser aus dem Saugrohr in das Gehäuse nach links, und der Wasserinhalt des Raumes über v^2 wird nach oben durch den Saugstutzen fortgedrückt. Bei der Umkehrung der Bewegung öffnen sich Saugventil v^2 und Druckventil v^3, während v^1 und v^4 sich schließen, die Pumpe ist also doppeltwirkend. Flügelpumpen saugen 7—7$^1/_2$ m, also etwa so hoch wie Kolbenpumpen, und drücken beliebig hoch je nach Festigkeit des Gehäuses und guter Dichtung der Flügel. Für dicke und unreine Flüssigkeiten werden statt der Klappen Kugelventile angewendet. Mit einem Druckwindkessel ausgerüstet, eignen sich Flügelpumpen gut als Gartenspritzen und auch für Förderung aus Tiefbrunnen (s. Abb. 145). — Eine andere Wasserförderungsvorrichtung, der hydraulische Widder, ist bereits früher beschrieben.



142. Kleine Walzenpumpe (Ansicht).

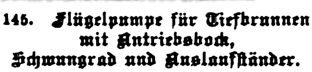
Im dritten Teile dieses Bandes werden im Zusammenhang mit der Geschichte der Dampfmaschine ältere Versuche beschrieben, den Wasserdampf zum direkten Heben von Wasser zu benutzen, welche als Vorläufer der Dampfmaschine zu betrachten sind. Hier sei im Auszuge eine der „hundert wunderbaren Erfindungen“ des Lord Worcester erwähnt, welche derselbe im Jahre 1663 in einer sehr anspruchsvollen Schrift veröffentlicht hat (nach Reuleaux' „Geschichte der Dampfmaschine“). „Eine wunderbare und kräftige Weise, Wasser durch Feuer aufzutreiben, nicht indem man es aufwärts zieht oder saugt, denn das muß sein, wie der Naturkundige es nennt, Intra sphaeram activitatis, was nur auf gewisse Entfernung ist (hiermit ist wohl die begrenzte Saughöhe der üblichen Pumpen gemeint). Aber diese neue Weise hat keine Grenzen, wenn die Gefäße stark genug sind; .... Ich habe das Wasser herauskommen sehen als springenden Strahl 40 Fuß hoch; ein Gefäß voll Wasser, verdünnt durch Feuer, treibt 40 auf von kaltem Wasser (es ist wohl die 40fache Menge gemeint). Und ein Mann, der das Werk bedient, hat bloß zwei Hähne zu drehen, damit, wenn ein Gefäß voll Wasser verbraucht ist, ein anderes zu treiben beginnt, und (ersteres) mit kaltem Wasser wieder aufzufüllen und so weiter,



143. Flügelpumpe (Schnitt). 144. Flügelpumpe (Ansicht).

während das Feuer unterhalten wird, was dieselbe Person besorgen kann." Nach dieser Beschreibung wird wohl niemand eine Dampfpumpe herstellen können, und es darf mit Recht bezweifelt werden, daß der gelehrte Lord selbst jemals eine solche konstruiert oder gesehen hat. Jedenfalls ist es nicht zulässig, Lord Worcester als den Erfinder der ersten direkt wirkenden Dampfpumpe zu betrachten, wie es von seinen Landsleuten versucht worden ist.

Eine direkt wirkende Dampfdruck-Wasserhebemaschine wurde dagegen 1698 von dem Engländer Thomas Savery erfunden; dieselbe ist im III. Teile bei der Geschichte der Dampfmaschinen näher besprochen und abgebildet. Sie war zwar sehr unvollkommen, ist aber dem Prinzip nach als das Vorbild des Pulsometers zu betrachten, einer direkt wirkenden Dampfpumpe, die in den letzten beiden Jahrzehnten für manche Verwendungszwecke vielfach eingeführt worden ist. Der Pulsometer ist gegen 1872 von dem Amerikaner Henry Hall erfunden worden; die eigentümliche Wirksamkeit desselben beruht darauf, daß gespannter Wasserdampf abwechselnd in zwei benachbarte Kammern tritt, die durch Ventile einerseits mit dem Saugrohrstutzen, anderseits mit einer gemeinschaftlichen Seitenkammer in Verbindung stehen, von welcher das Druckrohr ausgeht. Während der Dampf aus der einen Abteilung das Wasser in die Seitenkammer drückt, kondensiert der in der anderen Abteilung zurückgebliebene Dampf, wodurch in dieser ein Vakuum entsteht und Wasser aus dem Saugstutzen eingesaugt wird. Ist aus der ersten Kammer das Wasser ganz hinausgedrückt, so steuert das Dampfzuströmungsventil selbstthätig um, der Dampf strömt in die andere Abteilung und drückt aus dieser das vorher angesaugte Wasser nach der seitlichen Druckkammer, während durch die Kondensation jetzt in der anderen Kammer Wasser angesaugt wird. Der Pulsometer hat für manche Zwecke gewisse Vorzüge, da er außer den Ventilen keine beweglichen Teile besitzt; er bedarf keines Kraftantriebes, sondern nur einer Dampfzuleitung, kann also überall mittels eines transportablen Dampfkessels in Betrieb gesetzt werden. Allerdings arbeitet er nicht so ökonomisch, wie gute Kolbenpumpen; aber in vielen Fällen, wo es auf möglichst einfache Anordnung und geringe Anlagekosten ankommt, besonders für Wasserförderung zu vorübergehenden Zwecken, wie Entwässerung von Baugruben und Kellern, beim Abteufen von Brunnen und Schächten, Leerpumpen von Schiffsräumen oder von Docks, sowie auch als Reservepumpe für den Fall des Versagens der Hauptpumpanlage, z. B. bei Bergwerken, wird dieser Nachteil gegenüber den Vorzügen seiner leichten Anwendbarkeit und einfachen Betriebsweise gern in den Kauf genommen. Der Pulsometer kann an einer Wand befestigt oder auch an Ketten aufgehangen werden; einmal in Gang gesetzt, arbeitet er ununterbrochen weiter, solange Wasser vorhanden ist, und bedarf nur geringer Wartung, da die bei Kolbenpumpen notwendige Schmierung der Lager und Stopfbüchsen fortfällt. Er arbeitet mit Saughöhen bis annähernd 8 m und bis 80 m Druckhöhe. Abb. 146 zeigt einen



145. Flügelpumpe für Tiefbrunnen mit Antriebsbock, Schwungrad und Auslaufständer.



146. Pulsometer, System Neuhaus.

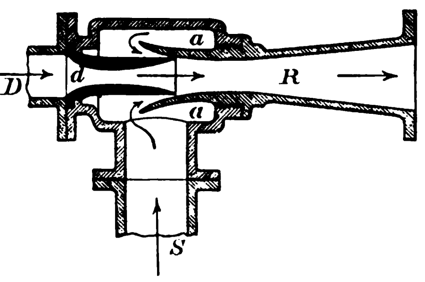
Pulsometer System Neuhaus; oben ist das Anschlußventil der Dampfzuleitung, unten der Wassersaugstutzen, vorn sind die Deckel zu den Ventilen abgenommen, so daß das untere Hauptsaugventil (über welchem noch rechts und links nicht sichtbar die Einzelsaugventile der beiden Kammern liegen) und die Druckventile zwischen den beiden Dampfkammern und der gemeinschaftlichen Druckkammer sichtbar sind; auf letzteren sitzt der Anschlußflansch der Druckleitung. Abb. 147 stellt die Anwendung eines Pulsometers mit provisorischem Lokomobilkessel zum Entwässern einer Baugrube dar.

Eine andere Pumpenart sind schließlich noch die Strahlpumpen, die in den letzten Jahren wegen mancher Vorzüge vor andern Pumpen für viele Zwecke in steigendem Maße Anwendung in der Technik gefunden haben und hier etwas ausführlicher besprochen werden sollen, da sie in weiteren Kreisen noch weniger bekannt sind. Nach dem Betriebsmittel unterscheidet man hauptsächlich Dampf- und Wasserstrahlpumpen, doch kann auch komprimierte Luft zum Betriebe dienen.



147. Anwendung des Pulsometers.

Das Wirkungsprinzip ist bei allen dasselbe; es sei an der schematischen Abb. 148 erklärt. Das Gehäuse a a trägt unten einen Anschlußstutzen für das Saugrohr S; links ist der Rohranschluß D für das Betriebsmittel, gespannten Dampf oder Druckwasser, und rechts ist der Druckrohranschluß R für das zu fördernde Wasser. Letzterer ragt mit einem trompetenförmigen Ansatz in das Gehäuse hinein, umgibt die Düse d, welche dicht an das Dampf- oder Druckwasserrohr angeschlossen ist, derart, daß zwischen beiden eine schmale ringförmige Öffnung bleibt. Der gespannte Dampf oder das Druckwasser strömt mit großer Geschwindigkeit durch das Zuleitungsrohr aus der Düse aus; beim Ausströmen reißt es die in dem ringförmigen Zwischenraum enthaltene Luft mit fort und erzeugt so in dem Raume a eine Luftverdünnung, so daß aus dem Saugrohr Wasser angesaugt wird und das Gehäuse anfüllt. Auch dieses wird jetzt von dem Dampf- oder Wasserstrahle mit fortgerissen und durch das Druckrohr fortgedrückt. Der Dampf oder das Wasser wirkt also durch seine lebendige Kraft, und es findet eine kontinuierliche Wasserförderung statt. Die Fördermenge und Förderhöhe hängt ab von dem Druck und der Menge des verwendeten Betriebsdampfes oder Druckwassers. Bei letzterem ist die Förderhöhe des gepumpten Wassers stets kleiner als die Druckhöhe des Betriebswassers. Wenn keine Kraftverluste stattfänden, würde die Beziehung bestehen: Menge × Druckhöhe des Betriebswassers = Menge × Saugehöhe des gepumpten Wassers + (Menge des gepumpten

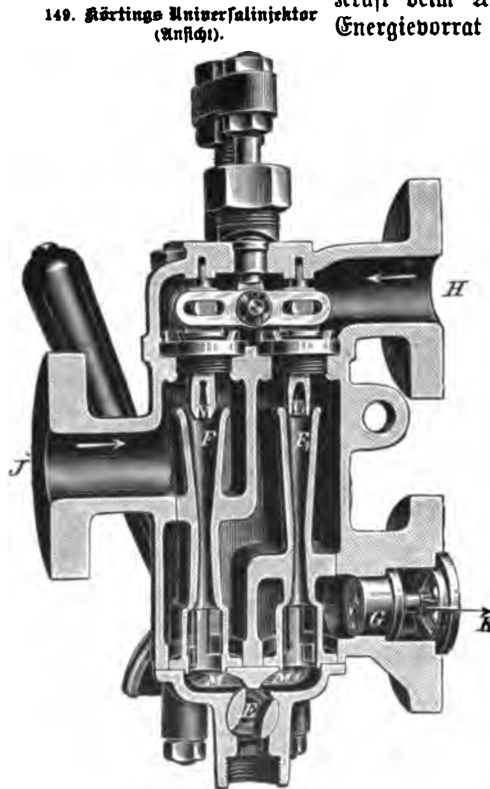


148. Strahlpumpe.

+ des Druckwassers) × Druckhöhe. Von der in dem Betriebswasser enthaltenen Energie kann für die nutzbare Förderarbeit nur der Überdruck über die Förderhöhe zur Geltung kommen, denn das Betriebswasser selbst muß mit auf die Förderhöhe steigen. Man kann also auch die Beziehung so aufstellen: Betriebswassermenge × (Betriebsdruck — Druckhöhe der Förderung) = gepumpte Wassermenge × Förderhöhe (Saughöhe und Druckhöhe). In Wirklichkeit ist indessen die Leistung stets geringer, und der Nutzeffekt hängt ab von dem Verhältnis des Betriebsdruckes zur Förderhöhe; bei hohem Betriebsdruck ist die Wirkung günstiger, im allgemeinen ist der Wirkungsgrad geringer als bei guten Kolbenpumpen. Bei Verwendung von Wasserdampf kann das Wasser höher gepumpt werden, als dem Dampfdrucke direkt entspricht, z. B. kann mit Dampf von 6 Atmosphären Spannung (entsprechend einem Druck von 60 m Wassersäule) eine Förderhöhe von 70 m erreicht werden. Dies scheint mit dem Gesetze der Erhaltung der Energie im Widerspruche zu stehen; thatsächlich ist dies aber keineswegs der Fall. Während nämlich bei Druckwasser nur die seiner Druckhöhe entsprechende lebendige Kraft in Betracht kommt und zur Wirksamkeit kommen kann, hat der gespannte Wasserdampf außer seiner lebendigen Kraft beim Ausströmen aus der Düse noch einen großen Energievorrat in seiner latenten Wärme. Dieser wird zum Teil nutzbar gemacht, indem er sich in lebendige Kraft umsetzt, die auf das Wasser übertragen wird, während ein Teil desselben bei der Kondensation des Dampfes in dem Wasser die Erwärmung des letzteren bewirkt.



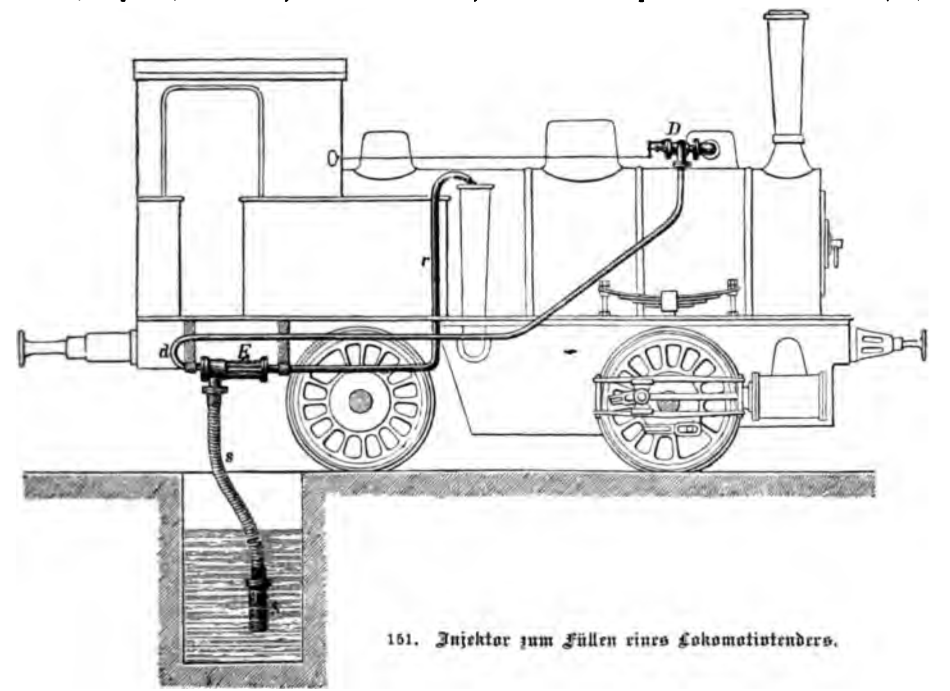
149. Körtings Universalinjektor (Ansicht).



150. Körtings Universalinjektor (Schnitt).

Der große Vorteil der Strahlpumpen gegenüber den Kolbenpumpen, wie auch den rotierenden Pumpen liegt darin, daß sie gar keine beweglichen Teile besitzen, keine Ventile und keine Stopfbüchsen oder sonstige Dichtungen; sie sind deshalb keiner Abnutzung unterworfen und bedürfen keiner Reparaturen. Sie sind jederzeit betriebsfertig; auch wenn sie jahrelang unbenutzt gewesen sind, können sie jederzeit durch bloßes Öffnen des Dampf- oder Druckwasserventils sofort in Thätigkeit gesetzt werden. Aus diesem Grunde eignen sie sich besonders als Reservepumpen für Betriebe, welche gewöhnlich im Dauerbetriebe mit rationeller arbeitenden Kolbenpumpen arbeiten, z. B. in Bergwerken. Wegen ihrer großen Einfachheit in der Aufstellung und Bedienung, sowie der Billigkeit der Anlage sind sie auch da besonders am Platze, wo nur zeitweise Wasser gepumpt werden soll, z. B. zum Entwässern von Kellern, Baugruben, Schächten beim Abteufen. In diesen Fällen kommt der ziemlich geringe Wirkungsgrad der Strahlpumpen gegenüber ihren Vorzügen weniger in Betracht. Die bekannteste und seit längerer Zeit allgemein eingeführte Strahlpumpe ist der Injektor zur Speisung von Dampfkesseln, der in neuerer Zeit die übrigen Kesselspeisepumpen vielfach verdrängt hat. Bei Lokomotiven z. B. wird allgemein fast nur noch der Injektor angewendet, und auch bei den meisten stationären Dampfkesseln findet sich als Haupt- oder als Reservespeisepumpe ein Injektor.

Die Abb. 149 u. 150 zeigen einen Dampfstrahlinjektor zur Dampfkesselspeisung in der verbesserten Konstruktion von Gebr. Körting zu Hannover, welche sich überhaupt seit Jahren um die Ausbildung der Strahlapparate besonders verdient gemacht und durch neue Erfindungen dieselben für die verschiedensten Verwendungszwecke dienstbar gemacht haben. Der abgebildete Universalinjektor ist aus zwei Injektoren kombiniert, von denen der erste das Wasser ansaugt und es mit geringem Druck dem zweiten zuführt, der es in den Kessel drückt. J ist der Wassersaugstutzen, G K das Druck- oder Speiseventil nach dem Kessel. Bei H strömt der Kesseldampf zu, durch den in der Ansicht vorn sichtbaren Handhebel wird zuerst dem Dampfe die Einströmung durch die Dampfdüse V geöffnet und aus dem Saugrohr wird Wasser in die Düse F gesaugt, welches zuerst einige Augenblicke durch den Kanal M abfließt. Beim langsamen Weiterbewegen des Handhebels wird dieser Kanal durch das Ventil E geschlossen, und das Wasser tritt durch die unteren seitlichen Öffnungen von F aus, steigt in dem Gehäuse in die Höhe und tritt in die Düse F_1 ein, aus welcher es unten durch den Kanal M_1 und das Ventil E abfließt.

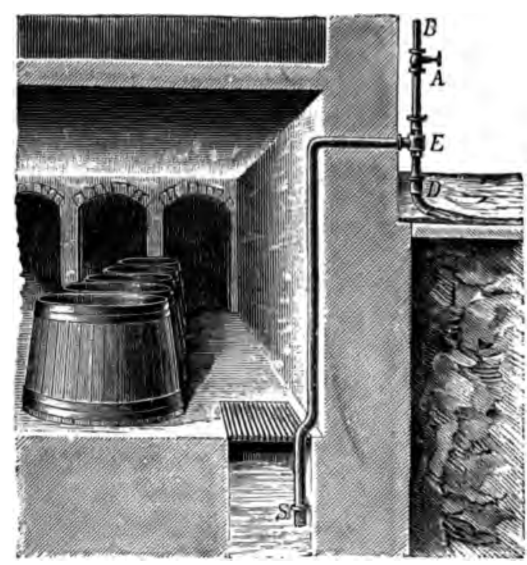


151. Injektor zum Füllen eines Lokomotivtenders.

Dann wird letzteres ganz geschlossen, dagegen gleichzeitig die Dampfdüse V_1 geöffnet, worauf das Wasser kontinuierlich durch das Speiseventil in den Kessel gedrückt wird. Während früher die Injektoren gewisse Übelstände besaßen, häufig versagten, nicht ansaugten, besonders kein warmes Wasser, arbeiten die neueren Konstruktionen, wie die beschriebene, sehr regelmäßig und zuverlässig, auch mit erwärmtem Wasser. Dies ist für Dampfkessel von Wichtigkeit, denn wo erwärmtes Wasser zur Speisung zur Verfügung steht, z. B. das Kondensationswasser bei Kondensationsmaschinen, wird hierdurch eine beträchtliche Kohlenersparnis erzielt. Die Körtingschen Universalinjektoren saugen kaltes Wasser bis 6 m hoch an und fördern, ohne zu saugen, bis zu 60° C. warmes Wasser. Durch den Dampf wird das Wasser in den Injektoren noch weiter erwärmt; dies ist für Kesselspeisung kein Energieverlust, wie bei anderen Verwendungen, denn die Erwärmung bedingt eine direkte Ersparnis an Unterfeuerung. Die Injektoren sind deshalb speziell als Kesselspeisepumpen andren Pumpen ebenbürtig und übertreffen die meisten derselben an Wirkungsgrad, da fast keine Wärme oder Energie verloren geht. Außerdem haben sie den Vorteil, daß sie einfach zu bedienen sind, wenig Raum einnehmen und an jeder beliebigen Stelle im Kesselhause angebracht werden können, sowie stets betriebsbereit sind,

auch während der Pausen des Maschinenbetriebes, wenn andre Speisepumpen, die von der Hauptmaschine betrieben werden, nicht arbeiten können.

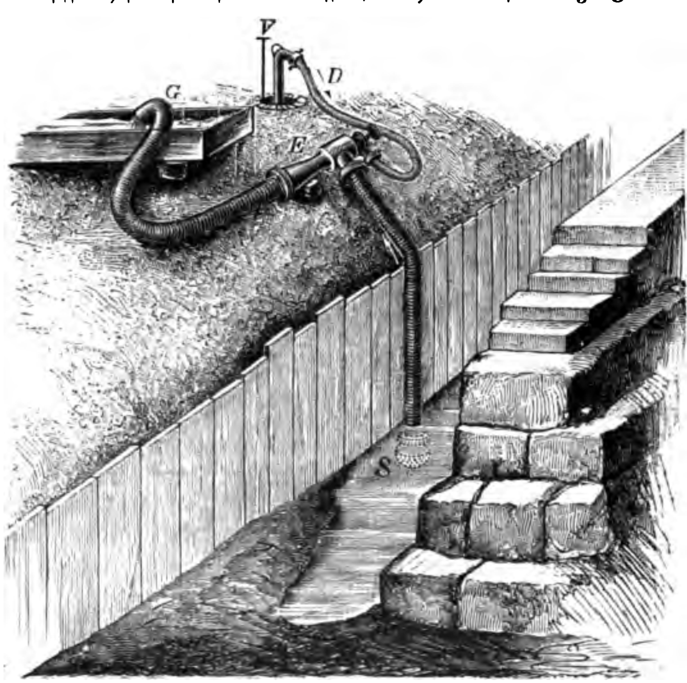
Abb. 151 zeigt die Anwendung eines Dampfstrahlinjektors zur Füllung eines Lokomotivtenders aus einem Brunnen; E ist der Injektor mit Dampfzuleitung D d, s ist das Saugrohr mit Saugkorb S, r das Druckrohr nach dem Wasserbehälter. In Abb. 152 ist noch die Verwendung einer Dampfstrahlpumpe zum Entwässern eines Kellers dargestellt. B ist die Dampfzuleitung mit Ventil A, E der Injektor, S das Saugrohr, D der Ausfluß.



152. Strahlpumpe zur Kellerentwässerung.

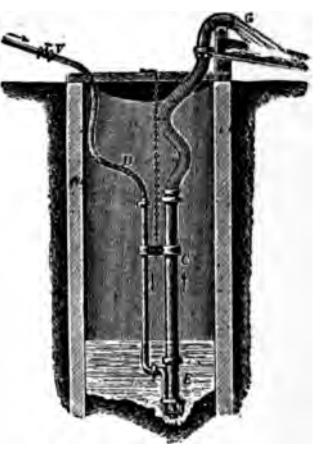
Die erwähnten Vorzüge der Strahlpumpen sind besonders wertvoll für ihre Verwendung auf Schiffen als Lenz- und Bilgepumpen (zum Auspumpen des untersten Schiffsraumes). Wenn genügender Dampf zur Verfügung steht, ist die unbegrenzte Betriebssicherheit, die sehr einfache Handhabung, der geringe Raumbedarf und besonders die jederzeitige Betriebsbereitschaft gerade für diesen Zweck von großer Wichtigkeit. Man kann sich auf die Dampfstrahlpumpen stets verlassen, auch wenn sie lange Zeit nicht gebraucht und nachgesehen worden sind.

Das über die Dampfstrahlpumpen Gesagte gilt fast ebenso für die Wasserstrahlpumpen oder Wasserstrahlelevatoren; während erstere überall Anwendung finden können, wo gespannter Dampf zur Verfügung steht, also in fast allen größeren industriellen Anlagen, sind letztere auf das Vorhandensein von Druckwasserleitung angewiesen. Die in der obigen Abb. 152 dargestellte Anordnung könnte in genau derselben Weise im Anschluß an die städtische Wasserleitung, wie durch Dampf betrieben werden.



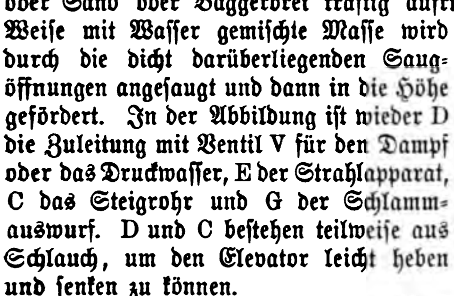
153. Wasserstrahlpumpe für Baugrubenentwässerung.

In Abb. 153 ist die Entwässerung einer Baugrube durch einen Wasserstrahlelevator im Anschluß an einen Hydranten der städtischen Druckwasserleitung dargestellt.



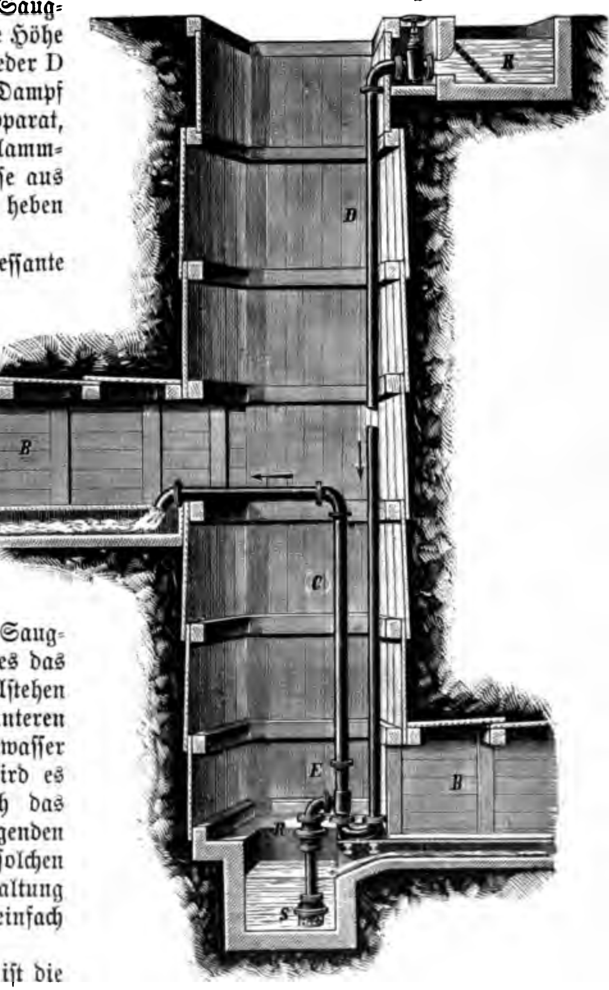
154. Strahlpumpe zum Entschlammen eines Brunnens.

E ist der Strahlapparat, D die Druckwasserzuleitung mit Ventilschlüssel V, S der Saugkorb, G der Abfluß des gepumpten Wassers. Man kann die Strahlpumpen aus den verschiedensten Materialien herstellen, welche für besondere Verwendungszwecke widerstandsfähig gegen Säuren oder Laugen sind. Da sie keine Ventile und keine beweglichen abzudichtenden Teile haben, so kann mit ihnen auch sehr verunreinigtes, schlammiges und sandhaltiges Wasser, selbst Schlamm und Sand gefördert werden, und man verwendet sie zur Beseitigung von aufgetriebenem Triebsand aus dem Boden von Kesselbrunnen, zum Reinigen von Bassins oder Teichen von Schlamm. Man hängt zu diesem Zwecke die Strahlapparate an Ketten frei bis dicht über den zu reinigenden Boden, wie Abb. 154 bei einem zu reinigenden Brunnen darstellt. Der Elevator ist für solche Zwecke so eingerichtet, daß ein Teil des Betriebsmittels (Dampf oder Druckwasser) unten aus Löchern nach außen austritt und den Schlamm oder Sand oder Baggerbrei kräftig aufrührt. Die auf diese



Weise mit Wasser gemischte Masse wird durch die dicht darüberliegenden Saugöffnungen angesaugt und dann in die Höhe gefördert. In der Abbildung ist wieder D die Zuleitung mit Ventil V für den Dampf oder das Druckwasser, E der Strahlapparat, C das Steigrohr und G der Schlammauswurf. D und C bestehen teilweise aus Schlauch, um den Elevator leicht heben und senken zu können.

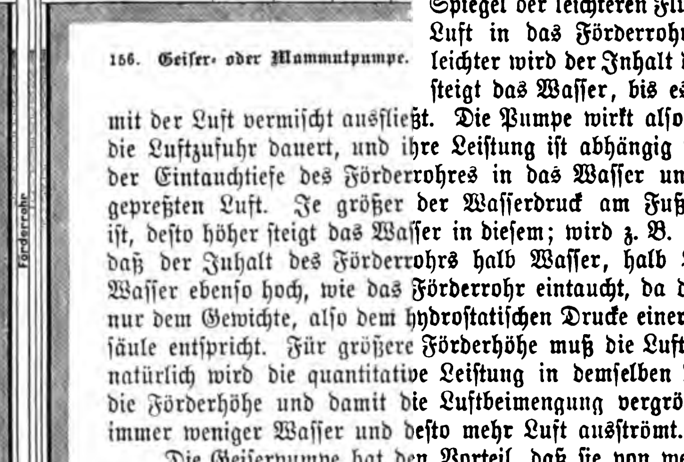
Abb. 155 zeigt noch eine interessante Anwendung eines Wasserstrahlelevators in einem Bergwerke, unter Benutzung von Tagwasser als Druckwasser, bei Abfluß mit natürlichem Gefälle durch einen seitlichen Stollen. Das Tagwasser sammelt sich in dem Behälter R, aus welchem es durch das Druckwasserrohr D, mit Schieber S, der nahe über dem tiefsten Punkt (dem sogenannten Sumpf) stehenden Strahlpumpe E zugeführt wird. S ist der Saugkorb, R ein Rückschlagventil, welches das Rückströmen von Wasser beim Stillstehen des Elevators verhindert. Aus dem unteren Stollen B sammelt sich das Grubenwasser in dem Sumpf, und aus diesem wird es mittels des Strahlelevators durch das Steigrohr C nach dem höher liegenden Abflußstollen B gehoben. Unter solchen Verhältnissen ist also die Wasserhaltung vollständig kostenlos und dabei einfach und sicher.



155. Bergwerksentsumpfung durch Wasserstrahlelevator.

Eine Pumpe besonderer Art ist die von Friedrich Siemens erfundene und

neuerdings wieder von der Firma A. Borsig in Berlin als „Mammutpumpe“ in Aufnahme gebrachte Geiserpumpe, die besonders als Tiefbrunnenpumpe Verwendung findet und mit Druckluft arbeitet. Wo Druckluft zur Verfügung steht oder leicht durch Maschinenkraft beschafft werden kann, bietet diese Vorrichtung manche Vorteile gegenüber anderen Tiefbrunnenpumpen, da sie keine Kolben und Ventile und auch kein Gestänge, überhaupt keine beweglichen Teile hat. Die Wirkungsweise ist höchst interessant und beruht auf dem Gesetze der kommunizierenden Röhren. In Abb. 156 ist die Anordnung schematisch dargestellt. Das in den Brunnen eintauchende Förderrohr ist durch ein Fußstück mit dem engeren Rohr für komprimierte Luft verbunden; die letztere wird durch eine Luftkompressionspumpe erzeugt und in einem Windkessel gesammelt. Der Druck muß so groß sein, daß er den Druck der Wassersäule im Brunnen vom Spiegel bis zum unteren Ende des Luftrohres, also dem Fußstücke, überwindet (also für 10 m Wassersäule rund 1 Atmosphäre Druck); die komprimierte Luft tritt unten aus und steigt in Blasen in dem Förderrohr in die Höhe. In letzterem steht zuerst das Wasser ebenso hoch, wie im Brunnen; durch die Luftblasen wird aber



156. Geiser- oder Mammutpumpe.

das Gewicht der Wassersäule leichter. Es ist nicht mehr eine reine Wassersäule, sondern ein Wasser-Luft-Gemisch, und jetzt findet dasselbe statt, als wenn in kommunizierenden Röhren in einem Schenkel Öl, im anderen Wasser wäre: der Spiegel der leichteren Flüssigkeit steigt. Je mehr Luft in das Förderrohr gedrückt wird, desto leichter wird der Inhalt des letzteren, desto höher steigt das Wasser, bis es in irgend einer Höhe mit der Luft vermischt ausfließt. Die Pumpe wirkt also kontinuierlich, solange die Luftzufuhr dauert, und ihre Leistung ist abhängig von der Pressung, also der Eintauchtiefe des Förderrohres in das Wasser und der Menge der eingepreßten Luft. Je größer der Wasserdruck am Fußstücke des Steigrohres ist, desto höher steigt das Wasser in diesem; wird z. B. so viel Luft eingepreßt, daß der Inhalt des Förderrohrs halb Wasser, halb Luft ist, so steigt das Wasser ebenso hoch, wie das Förderrohr eintaucht, da der Inhalt des letzteren nur dem Gewichte, also dem hydrostatischen Drucke einer halb so hohen Wassersäule entspricht. Für größere Förderhöhe muß die Luftmenge größer werden; natürlich wird die quantitative Leistung in demselben Maße vermindert, als die Förderhöhe und damit die Luftbeimengung vergrößert wird, indem oben immer weniger Wasser und desto mehr Luft ausströmt.

Die Geiserpumpe hat den Vorteil, daß sie von weither betrieben werden kann, ohne irgend welche bewegliche Übertragungsmittel des Antriebs; von der Luftkompressionspumpe oder dem Druckwindkessel braucht nur eine Rohrleitung für die Druckluft zum Brunnen geführt zu werden. Letzterer kann mehrere hundert Meter von der mit Wasser zu versorgenden Fabrik entfernt an geeigneter Stelle liegen. Für einzelne Häuser ohne gewerblichen und maschinellen Betrieb ist die Mammutpumpe nicht geeignet, weil hier die Luftkompression zu umständlich ist.

Die größten Pumpwerke für regelmäßigen Betrieb finden sich bei Bergwerken und städtischen Wasserwerken, sowie auch bei Dockanlagen. Bei Bergwerken bietet außer der häufig großen Menge der zu bewältigenden Grubenwässer oft auch die bedeutende Förderhöhe Schwierigkeiten. Es gibt Bergwerksschächte von einer Tiefe bis 1200 m. Von den kolossalen Wassermengen, die aus Bergwerksrevieren mit starkem unterirdischen Wasserzudrang gefördert werden müssen, damit die Gruben nicht „versaufen“, kann man sich kaum einen Begriff machen. In den Viktorgruben zu Milowice in Russisch-Polen fördert eine unterirdische Zwillings-Wasserhaltungsmaschine pro Minute 17 100 l Wasser 165 m hoch. Noch bedeutend größer sind die Pumpenleistungen bei den Schächten der Mansfeldschen Kupferschiefer bauenden Gewerkschaft zu Eisleben. Dieses sehr alte, große,

früher von einer Anzahl getrennter Gewerkschaften betriebene Bergwerksunternehmen hatte von jeher sehr mit starkem Wasserandrang zu den Abbauen der Kupferschieferflöze zu kämpfen. Früher, als die Baue noch nicht so tief vorgedrungen waren, war eine natürliche Entwässerung möglich durch besondere Stollen, welche das ansammelnde Wasser seitlich nach tiefer gelegenen Thälern und Flußbetten abführten; später war dies aber durch die vorhandenen Stollen nicht mehr möglich. Schon 1809 verbanden sich die damals noch bestehenden fünf getrennten Gewerkschaften zur Herstellung eines großen neuen sogenannten Schlüsselstollens für die Entwässerung. Derselbe wurde erst 1879 vollendet und hat eine Länge von 31 000 m. Hiermit war der nach der topographischen Gestaltung der Gegend mögliche tiefste natürliche Wasserabfluß hergestellt. Beim Tieferdringen wurde nun von allen Schächten das Grundwasser in diesen gemeinschaftlichen Schlüssel gepumpt. Seit Ende der achtziger Jahre nahmen die Wassermengen kolossal zu. In einem zusammenhängenden Revier, umfassend Ottoschacht II, Ottoschacht IV, Segengottesschacht und Ernstschächte, waren 1893 für die Wasserbewältigung im Betrieb: 4 Tagespumpmaschinen und 3 unterirdische Maschinen mit einer Leistungsfähigkeit von zusammen 79 cbm Wasserförderung pro Minute oder 1800 l pro Sekunde. Sie haben im Jahre 1892 im Durchschnitt in ununterbrochenem Betriebe 66 cbm Wasser pro Minute oder im Jahre 34½ Millionen gehoben.

Auch die Pumpwerke für die Wasserversorgung großer Städte haben einen sehr bedeutenden Umfang. Die Hamburger Wasserwerke arbeiten in den Pumpstationen durchschnittlich mit etwa 900 Pferdestärken Maschinenleistung; die Pumpen fördern im Jahre 44 Millionen cbm Wasser, die größte Tagesförderung betrug 161 000 cbm, und die größte stündliche Leistungsfähigkeit der Werke beträgt 10 000 cbm oder 160 000 l pro Minute. Die Berliner Wasserwerke haben im Jahre 1895/96 49 Millionen cbm Wasser zur Stadt gepumpt, wobei die Maschinen durchschnittlich mit ca. 1194 Pferdestärken Leistung gearbeitet haben. Die maximale Fördermenge an einem Tage betrug 187 000 cbm; in einer Stunde können die Pumpmaschinen ca. 15 000 cbm Wasser fördern oder pro Minute 250 000 l.

Eine der großartigsten aller jemals ausgeführten Pumparbeiten ist wohl die **Trockenlegung des Haarlemer Meeres** in Holland gewesen, durch die weite Landstrecken im Gebiete des Rheindeltas, die im Laufe der Zeit vom Wasser verschlungen worden waren, wieder trocken gelegt und der Bebauung gewonnen worden sind. Große Landstriche Hollands liegen mit ihrem Niveau wenig über und teilweise unter mittlerer Meereshöhe; sie sind seit Jahrhunderten gegen das Eindringen der Meereswogen durch ausgedehnte, mit größter Sorgfalt unterhaltene Deichanlagen geschützt worden. Weitverzweigte Kanalsysteme mit Schleusenanlagen bewirken die Entwässerung während der Ebbezeit, welche außerdem durch Hunderte von kleinen Schöpfwerken, durch Windmühlen betriebene Wasserschnecken unterstützt wird. Bei großen Sturmfluten in früheren Jahrhunderten, von denen besonders die furchtbare friesische im Jahre 1230, welcher Hunderttausende von Menschen zum Opfer fielen, in schreckensvoller Erinnerung geblieben ist, sind viele dieser Anlagen dem unwiderstehlichen Andrang der Meereswogen zum Opfer gefallen und große Landstrecken überflutet worden, welche früher Tausenden von fleißigen, ackerbautreibenden Familien den Lebensunterhalt boten. Auf diese Weise ist das bis zum dreizehnten Jahrhundert aus einzelnen kleineren Seen bestehende Haarlemer Meer entstanden, welches vom Jahre 1530 bis 1648 von 5600 ha Fläche auf 14 200 ha angewachsen war; die Abb. 157 u. 158 lassen die Veränderungen in diesem Zeitraume erkennen.

Zu wiederholten Malen wurden Vorschläge gemacht und Projekte aufgestellt, das Wasser aus den überschwemmten Gebieten wieder auszupumpen, wobei früher eine große Zahl Windmühlen, später, in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts, eine Anzahl Dampfpumpwerke für die Entwässerung vorgesehen waren, aber die Aufgabe erschien für die damaligen Verhältnisse zu groß und schwierig, und die Ausführung unterblieb. Die Zerstörung schritt unterdessen immer weiter fort, und in den dreißiger Jahren dieses Jahrhunderts bedeckte das Haarlemer Meer annähernd 18 000 ha. Inzwischen waren in den nördlicher gelegenen Gebieten in zähem, unablässigem, mehrere hundert Jahre an-

dauerndem, schwerem Ringen große Strecken überfluteten Landes wieder trocken gelegt und gesichert worden, wie aus einer Vergleichung der Karten von 1530 und von 1852 (Abb. 157 u. 159) ersichtlich ist. Durch zwei furchtbare, unermeßliche Verwüstungen anrichtende Sturmfluten im Jahre 1836, von denen die eine, von Westen kommend, das Haarlemer Meer nach Osten bis an die Mauern von Amsterdam vergrößerte, wobei 4000 ha Land überflutet wurden, die andere am Weihnachtstage die Fluten nach Leiden zu über einen Raum von 7400 ha trieb, wurde endlich die Inangriffnahme umfassender Wiederherstellungs- und Sicherungsarbeiten eine Notwendigkeit. Im Jahre 1840 wurden die Arbeiten begonnen mit der Ausführung eines großen Ringdeiches und eines Kanals; dieselben waren in acht Jahren vollendet, so daß 1848 und 1849 die inzwischen gebauten drei Riesendampfpumpmaschinen in Betrieb gesetzt werden konnten. Nach etwas mehr als drei Jahren waren 830 Millionen cbm Wasser ausgepumpt; das große Werk war vollendet, der jahrhundertelang vom Meere bedeckte Boden wieder trocken gelegt und der Besiedelung wiedergewonnen.



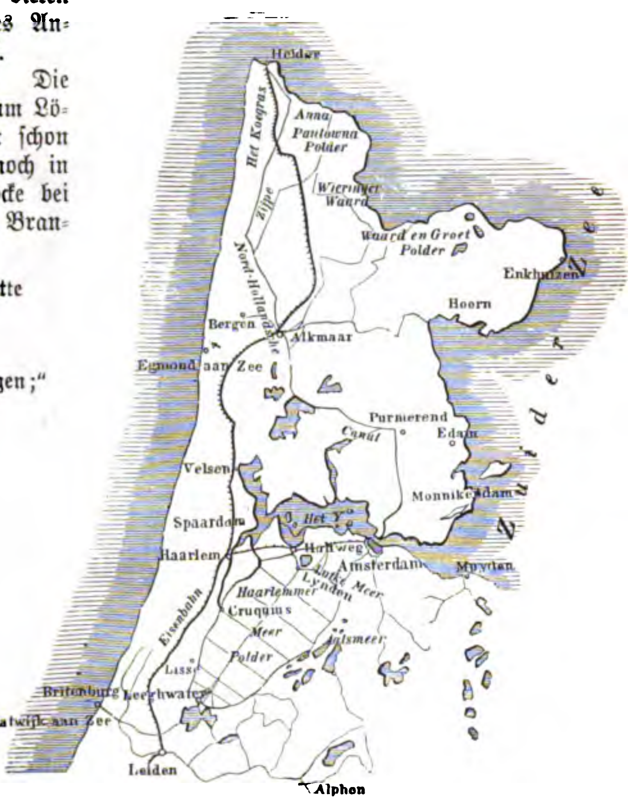
157. Ausdehnung des Haarlemer Meeres im Jahre 1530.

Ein noch viel großartigeres Projekt tauchte während der Ausführung dieser Arbeiten auf, die **Trockenlegung** der nördlich gelegenen **Zuidersee**, welche 360 000 ha bedeckt. Bei dieser liegen die Verhältnisse ähnlich wie beim Haarlemer Meer. Auch die ungeheure Fläche, die dieses Binnenmeer bedeckt, war früher fruchtbares Land, welches im 12. und 13. Jahrhundert durch Sturmfluten überschwemmt worden ist. In den ersten Projekten in der Mitte dieses Jahrhunderts wurde vorgeschlagen, die Zuidersee durch einen Damm ganz vom Meere abzutrennen und vollständig durch Auspumpen trocken zu legen; diese Projekte waren aber nicht ausführbar, und erst 1875 befaßte sich die Regierung mit dem Gedanken, durch teilweise Trockenlegung dieses Gebiet wiederzugewinnen. Nach langen, sorgfältigen Vorarbeiten und Erhebungen wurde 1892 ein vollständig ausgearbeitetes Projekt einer von der Regierung eingesetzten Kommission zur Prüfung vorgelegt, und diese hat in einem Berichte 1894 das Gutachten abgegeben, daß die Ausführung des Planes möglich sei, im Interesse des Landes liege und auf Staatskosten zu empfehlen sei. Nach dem Projekt soll von der Zuidersee das Yssełmeer in der Größe, die es vor den Flutkatastrophen vor 600 und 700 Jahren hatte, bestehen bleiben, das übrige Gebiet in einzelnen Abteilungen, sogenannten Poldern, ausgepumpt und ein-



158. Ausdehnung des Haarlemer Meeres im J. 1648.

gedeicht werden. Gegen das Meer soll ein 27½ km langer Damm ausgeführt werden mit sehr großen Schleusen für die Verbindung der Yssel mit dem Meere und den Schiffsfahrtsverkehr. Für das Auspumpen sind eine Anzahl Dampfpumpwerke mit zusammen 14 000 Pferdestärken Leistung vorgesehen. Die zu gewinnenden Polder haben nach dem Plane 211 800 ha Gesamtfläche. Die Ausführung der gesamten Arbeiten ist auf 33 Jahre berechnet, und die Kosten sind auf 296 Millionen Mark veranschlagt. Bis jetzt ist noch kein endgültiger Beschluß über den ganzen Plan gefaßt worden; vielleicht wird aber noch vor dem Schlusse des scheidenden Jahrhunderts dieses Riesenwerk menschlicher Intelligenz und Ausdauer in Angriff genommen, welches Holland eine schöne, reiche Provinz wiedergewinnen und vielen Tausenden Landleuten neues Ansiedelungsterrain schaffen soll.



159. Karte von Nordholland vom Jahre 1852.

Die Feuerspritzen. Die Verwendung von Spritzen zum Löschen von Schadenfeuern ist schon sehr alt. Zwar finden wir noch in Schillers Lied von der Glocke bei der lebhaften Schilderung des Brandes die Stelle:

> „Durch der Hände lange Kette
> Um die Wette
> Fliegt der Eimer,
> Hoch im Bogen
> Spritzen Quellen Wasserwogen;“

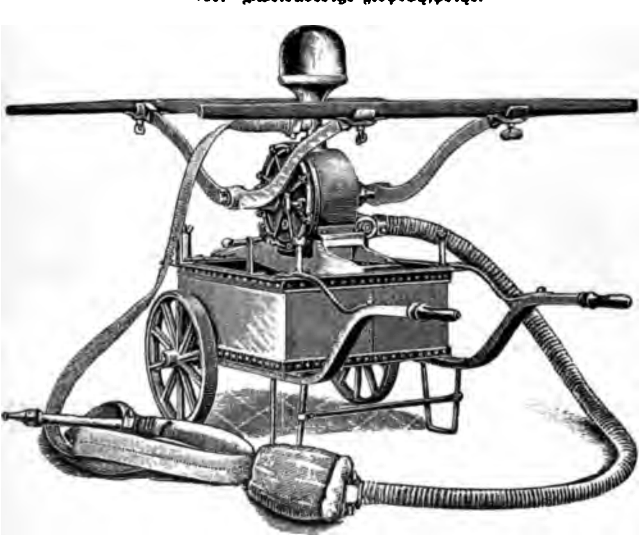
eine Feuerspritze wird hier nicht erwähnt, aber wir können doch die Schilderung so auffassen, daß die in langer Reihe stehenden, eine Kette bildenden Menschen mit den Eimern nur der Spritze das Wasser zubrachten, durch die dann der Wasserstrahl hoch im Bogen in die Flammen geschleudert wurde. Die erste Feuerspritze wurde schon im Altertum, wahrscheinlich von dem Alexandriner Ktesibios erfunden, durch Zusammenstellung zweier Druckpumpen, die abwechselnd in eine gemeinsame Ausspritzöffnung wirkten; diese ältesten Feuerspritzen hatten noch keinen Windkessel, der Wasserstrahl wurde nicht kontinuierlich, sondern in Absätzen, den Druckhüben der Kolben entsprechend, ausgeworfen.

Eine Feuerspritze ist im allgemeinen nichts anderes, als eine besonders sorgfältig ausgeführte und den besonderen Verhältnissen des Verwendungszweckes angepaßte doppeltwirkende Saug- und Druckpumpe mit einem gemeinschaftlichen Druckwindkessel. Die Feuerspritzen sollen sehr solide und doch möglichst leicht sein; meist haben sie zwei Pumpenstiefel, welche durch einen Doppelschwengel so bewegt werden, daß der eine Kolben seinen Druckhub macht, während der andere saugt. Die Spritzen können ihr Wasser aus einem Brunnen oder benachbarten Teich u. s. w. selbst ansaugen, oder es wird ihnen zugebracht. Immer aber ist es am besten, wenn die Spritzen keine lange Saugleitung und keine große Saughöhe haben; meist stehen sie mit ihren Pumpenstiefeln in einem Wasserkasten, der auf dem Wagengestell montiert ist und durch Zutragen von Hand oder durch die Wasserleitung oder Anschluß an trans-

portable Wasserkästen oder auch durch besondere sogenannte Zubringerpumpen gefüllt gehalten wird. Man hat Wagenspritzen, die fest mit dem Wagengestell verbunden sind und auch während der Löscharbeit auf dem Wagen verbleiben, und Abprotzspritzen, die auf der Löschstelle vom Wagen herabgenommen und auf den Boden gestellt, „abgeprotzt“ werden. Abb. 160 zeigt eine kleinere zweiräderige Abprotzspritze, auf dem Wagen sitzend, vor dem Abprotzen. In dem Wasserkasten sind die beiden schräg stehenden Pumpenstiefel und der dazwischen sitzende runde Windkessel sichtbar.

160. Zweiräderige Abprotzspritze.

In neuerer Zeit werden auch mit Erfolg die schon besprochenen Flügelpumpen zu Feuerspritzen verwendet. Abb. 161 zeigt eine solche kleinere Spritze von Gotthard Allweiler zu Radolfszell in Baden; sie besteht aus einer besonders gut gearbeiteten, vierfach wirkenden Flügelpumpe (wie sie früher beschrieben wurde), mit nach beiden Seiten durchgehender Welle und aufgesetztem Druckwindkessel. Die Achse trägt an beiden Seiten doppelarmige Hebel, an welchen beiderseits die Stangen zum Angreifen der Pumpmannschaft befestigt sind. Von dem Druckrohrstutzen unter dem Windkessel geht der Druckschlauch ab; die Pumpe kann, je nach Stellung eines Dreiwegehahnes, direkt aus dem Wasserkasten des Wagens oder mittels des Saugeschlauches aus einem benachbarten Wasserbehälter, Bache oder dergl. saugen. Auch als Zubringerpumpen für größere Feuerspritzen kann diese Spritze zweckmäßig verwendet werden.

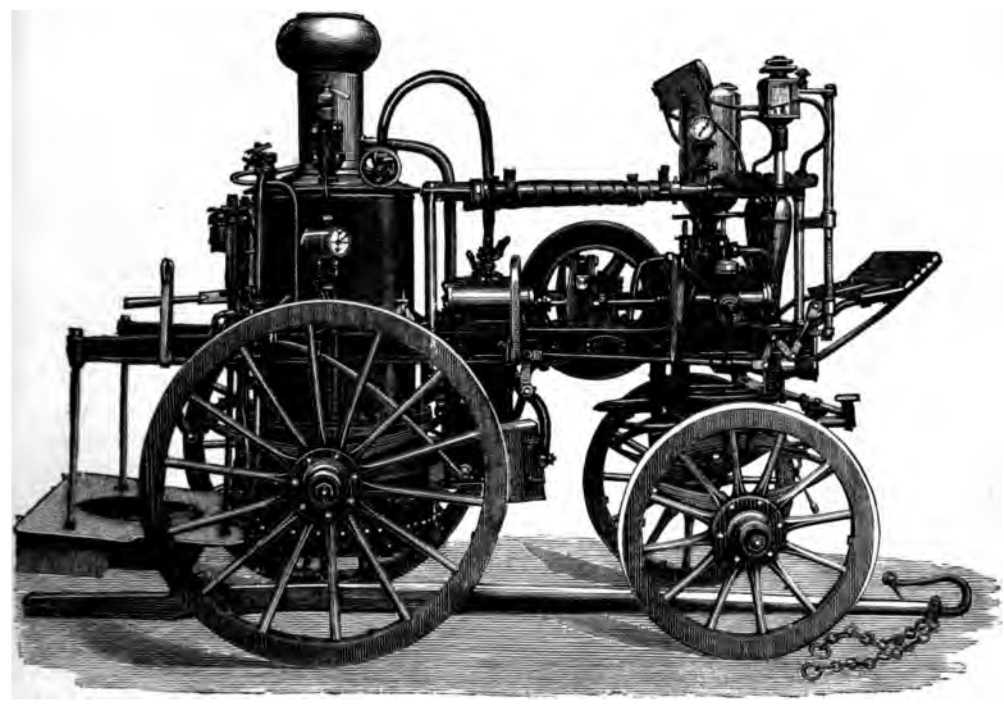


161. Feuerspritze mit Flügelpumpe.

In großen Städten werden für die Löschung von Großfeuer seit mehreren Jahren Dampfspritzen angewendet, welche ganz bedeutende Wassermengen in den Brandherd werfen können und deshalb von großer Wirksamkeit sind; auch in mittleren Städten streben die Feuerwehren die Beschaffung mindestens einer kompletten Dampffeuerspritze an. Eine solche der Spezial Feuerspritzenfabrik von Flader in Jöhstadt (Sachsen) ist in Abb. 162 dargestellt. Sie hat einen stehenden Quersiederohrkessel, welcher in etwa

8—10 Minuten angeheizt und auf Druck gebracht werden kann; derselbe speist eine liegende, auf dem Wagenrahmen montierte Dampfpumpe. Diese hat zwei Dampfcylinder, deren Kolben zwei horizontale doppeltwirkende Pumpenkolben betreiben. Bei der größten Nummer dieser Dampfspritze arbeitet die Dampfmaschine mit 16 Pferdekräften bei 9 Atmosphären Kesseldruck; sie hat die außerordentliche Leistungsfähigkeit von 1500 l Wasserlieferung pro Minute, und die Wurfweite des Strahles beträgt bei Anwendung nur eines Strahlrohres 50—60 m bei einer Stärke des Wasserstrahles von 28 mm.

Für Fabriken, Mühlen, Magazine, Geschäftshäuser, sowie auch für Wohnhäuser kommen in den letzten Jahren vielfach kleine Handfeuerspritzen unter verschiedenen Namen, z. B. Annihilatoren oder Hydropulte, zur Anwendung, die dazu dienen, im Entstehen begriffene Brände zu löschen, oder zunächst bis zum Eintreffen der Feuerwehr zu bekämpfen. In Abb. 163 ist ein solcher Annihilator dargestellt. Derselbe enthält in einem



162. Dampfspritze.

Blechgefäß, welches stets voll Wasser gehalten wird, eine eincylindrige Saug- und Druckpumpe; der ganze Apparat kann von einer Person getragen und bedient werden.

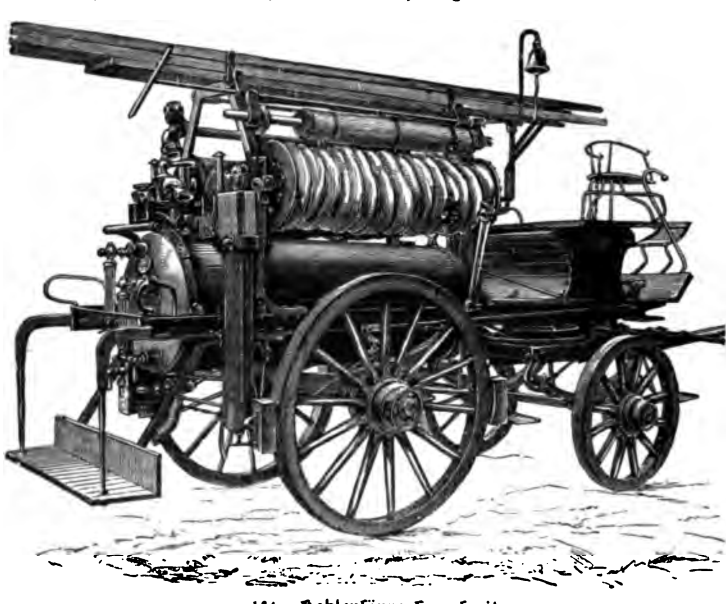
Eine ganz neue Feuerspritzenkonstruktion ist die in den letzten Jahren eingeführte Kohlensäure-Feuerspritze von F. J. Stumpf in Breslau. Dieselbe hat den Zweck, für den ersten Angriff eines Brandes die übrigen Spritzen und die dieselben speisenden Wasserwagen so lange zu ersetzen und Hilfe zu leisten, bis letztere mit genügenden Druckmannschaften zur Stelle und die Hydranten der städtischen Wasserleitung aufgedeckt und angeschlossen sind. Sie ist unter diesem Gesichtspunkte vollständig selbständig konstruiert und führt alles für den ersten Angriff Erforderliche, wie Hakenleitern, Druckschläuche, Rauchapparat, Hydrantenschlüssel und Aufsatzrohr zur späteren Verbindung der Hydranten, mit sich. In Breslau fährt die Kohlensäurespritze zuerst aus, und sie gibt zuerst Wasser auf der Brandstelle. Die Konstruktion ist folgende. Auf dem Wagen liegt ein eiserner, geschweißter Kessel von 600 l Inhalt, der auf 10 Atmosphären Druck geprüft ist. Neben demselben stehen zwei der bekannten starken schmiedeeisernen Flaschen mit flüssiger Kohlensäure (wie sie in den letzten Jahren allgemein zum Bierausschank verwendet werden) von je 8 kg Inhalt. Die flüssige Kohlensäure hat bei 15° C. Temperatur 52 Atmosphären

Spannung. Sobald der Verschluß einer Flasche geöffnet wird, entwickelt sich mit Heftigkeit gasförmige Kohlensäure, welche so lange ausströmt, bis alle flüssige Kohlensäure in den gasförmigen Zustand übergegangen ist. Die beiden Kohlensäureflaschen sind mit dem mit Wasser gefüllten Kessel durch Rohre und Ventile verbunden; auf der Brandstelle angekommen, wird der Strahlrohrschlauch mit dem Kessel verbunden, und sobald jetzt die Verbindung mit den Kohlensäureflaschen geöffnet wird, tritt die gasförmige Kohlensäure in den Kessel und erzeugt in demselben einen Druck von 4 Atmosphären, so daß das Wasser kräftig aus dem Schlauch und dem Strahlrohr ausgeworfen wird. Um Sicherheit gegen Explosion des Kessels zu bieten, ist die Konstruktion so angeordnet, daß die Schlauchanschlußöffnung stets offen ist, und die Weite des Übertrittsrohres für die Kohlensäure so gewählt, daß bei 10 mm Durchmesser des Strahlrohrmundstückes der Druck nicht über 4 Atmosphären steigen kann. Während für den ersten Angriff die Kohlensäure den Wasserinhalt des Kessels austreibt und in die Flammen wirft, wird der nächste Hydrant der Wasserleitung mit dem aus der Kohlensäurespritze spritzenden Schlauch verbunden, ohne daß hierdurch die Thätigkeit gestört wird; nach Öffnen des Hydranten kann man dann durch Umstellen eines Dreiwegehahnes direkt mit demselben Schlauch aus dem Hydranten spritzen.



163. Annihilator.

Zum Schluß mögen noch die Dampfstrahl- und Wasserstrahl-Feuerspritzen erwähnt werden, welche von der schon genannten Firma Gebrüder Körting zu Hannover eingeführt worden sind. Dieselben sind außerordentlich einfach in der Anordnung und sehr geeignet für Etablissements mit Dampfkesselbetrieb, besonders für solche, die keine Hydranten im Anschluß an eine Druckwasserleitung haben. Vom Dampfkessel aus wird eine Dampfleitung in einem gemauerten kleinen Kanal zu einer Dampfstrahlpumpe geführt, die in oder über einem Brunnen, einem Wasserreservoir oder Teich steht. Die Druckseite derselben ist mit Schlauchverschraubung zum Anschluß des Spritzenschlauches versehen. Bei ausgedehnten Anlagen wird das Druckrohr der Strahlpumpe über den ganzen Fabrikhof, in die Nähe der Gebäude, Speicher, Lagerschuppen u. s. w. geführt und an mehreren Stellen mit Anschlußstutzen versehen, die in kleinen abgedeckten Schächten



164. Kohlensäure-Feuerspritze.

liegen. Die Dampfstrahl-Feuerspritze ist höchst einfach zu bedienen: beim Entstehen eines Feuers braucht nur das Ventil der Dampfleitung beim Kessel geöffnet und ein Schlauch an die Strahlpumpe oder eine Anschlußstelle des Druckrohres auf dem Platze angeschlossen zu werden, worauf sofort jeder Arbeiter mit dem Löschen beginnen kann. Da der Apparat gar keine beweglichen Teile besitzt, keiner Abnutzung unterworfen ist und deshalb nie in Unordnung geraten kann, so kann die Einrichtung zu jeder Zeit, auch wenn sie jahrelang nicht benutzt worden ist, ohne weiteres in Benutzung genommen werden. Aus diesen Gründen ist die Dampfstrahl-Feuerspritze auch für Dampfschiffe sehr brauchbar.

Die Leistungsfähigkeit hängt ab von der Größe des Strahlapparates, der Größe der Dampfzuleitung und dem Kesseldruck, dann aber auch noch von der Länge und Weite des Druckrohres oder Schlauches. Eine Höhe des Wasserstrahles von 20 m, wie sie bei den Hydranten städtischer Wasserleitungen verlangt wird, kann schon mit einem Kesseldruck von 2—3 Atmosphären erreicht werden.

Wo eine Hochdruckwasserleitung vorhanden ist, wie bei Hafen- und Quaianlagen mit Hochdruckwasser-Kraftwasserversorgung, können Strahlpumpen auch im Anschluß an diese als Feuerspritzen benutzt werden. Hierbei wird eine geringe Menge des unter hohem Druck (meist 50 Atmosphären) stehenden Wassers in dem Strahlapparat benutzt, um große Mengen Wasser aus einer anderen Leitung mit geringem Druck oder direkt aus dem Hafen, oder einem Reservoir, mit 6—8 Atmosphären Druck auszuwerfen. In dem Hamburger Freihafengebiet sind außen 15 Körtingsche Hochdruck-Wasserstrahlelevatoren von je 1600 l Leistungsfähigkeit pro Minute zu Feuerlöschzwecken untergebracht und außerdem in den Speicheranlagen noch 134 Stück von 700 l Leistung pro Minute. Ebenso hat die Hafenanlage zu Bremen 50 solcher Apparate.

Die Mechanik der luftförmigen Körper.

Der Luftdruck. Horror vacui. Torricelli. Pascal. Schwere der Luft. Die Atmosphäre. Auftrieb der Luft. Luftballon. Otto von Guericke. Luftpumpe. Magdeburger Halbkugeln. Mariottesches und Gay-Lussacsches Gesetz. Manometer, Vakumeter und Barometer. Pneumatischer Wasserstandszeiger. Selbstregistrierender Manometer. Neuere Luftpumpen. Versuche mit der Luftpumpe. Wasserkastenluftpumpe. Dampf- und Wasserstrahlluftsauger. Pneumatische Abortentleerung. Schornsteinventilator. Kompressionsluftpumpen. Windbüchse und Druckluft-Dynamitgeschütze. Wasserstrahl-Luftdruckapparat. Zentrifugalluftpumpe. Ventilation. Rotierender Ventilator. Druckluftventilation in Bergwerken. Streudüse zur Ventilation. Pneumatische Brief- und Paketbeförderung. Berliner Rohrpost. Pneumatische Eisenbahn. Druckluftbahn.

Schon bei der Besprechung der Aggregatzustände ist kurz dargelegt worden, daß die gemeinschaftliche Eigenschaft aller Gase die Expansivkraft ist, vermöge welcher alle luftförmigen Körper bestrebt sind, sich auszudehnen.

Ferner haben wir bereits die Eigenschaft der atmosphärischen Luft kennen gelernt, auf alle Körper einen bestimmten Druck auszuüben, und haben hierdurch die Wirkung der Heber und der Pumpen erklärt.

Die Entdeckung des Luftdruckes ist einer der wichtigsten Fortschritte in der Naturwissenschaft gewesen. Sie ist erst sehr spät erfolgt, obwohl manche Erscheinungen, die auf dem Luftdruck beruhen und durch diesen ihre ungezwungene Erklärung finden, schon seit langer Zeit bekannt waren, so die Heber und die Pumpen. Diese Erscheinung war von den alten Naturphilosophen durch den horror vacui, den „Abscheu der Natur vor dem leeren Raum“, erklärt worden; die Natur habe einen unüberwindlichen Widerwillen vor jedem leeren Raume und sei bestrebt, wo ein solcher entstehe, denselben sofort mit irgend einem Stoffe auszufüllen. Wenn also durch Heben des Kolbens einer Saugpumpe unter demselben ein leerer Raum entstehe, so müsse infolge des horror vacui sofort das darunter befindliche Wasser in die Höhe steigen, um denselben auszufüllen. Es wurde demnach ein förmlicher bewußter Wille der Natur angenommen, ähnlich der schon früher erwähnten

„treibenden Liebe“. Erst zur Zeit Galileis kam man zu der Einsicht, daß der horror vacui doch kein für alle Fälle stichhaltiges Naturgesetz sein könne. Zweifellos hat man auch früher schon häufiger gefunden, daß Saugpumpen nur für beschränkte Saughöhen anwendbar sind, denn sonst wäre die schon sehr alte Erfindung der Druckpumpen überflüssig gewesen, aber niemand hatte es verstanden, aus solchen Erscheinungen die richtigen Schlüsse zu ziehen.

Erst 1643 entdeckte Torricelli (1608—47), ein Schüler Galileis und der Gehilfe des erblindeten Greises in der letzten Zeit vor dessen Tode, den Luftdruck. Die Veranlassung hierzu gab der Umstand, daß eine Pumpe in Florenz nicht über 32 Fuß hoch Wasser ansaugen wollte. Dieser Fall beschäftigte einige Zeit lebhaft die gelehrte Welt. Auch der scharfsinnige und philosophisch geschulte Galilei wußte die Erscheinung nicht zu erklären, trotzdem er längst wußte, daß die Luft ein Gewicht hat, welches er schon zu bestimmen versucht hatte, und trotzdem er schon den Widerstand, also den Druck der Luft bei seinen Pendelversuchen erkannt hatte; er fand die Verbindung zwischen dem Luftdruck und dem angenommenen horror vacui nicht. Da fand Torricelli die Erklärung, indem er die richtigen Konsequenzen aus der von seinem Lehrer Galilei erwiesenen Thatsache zog, daß die Luft schwer sei; er schloß, daß nur die Schwere der Luft es sei, die das Wasser in einem luftleeren Raum in die Höhe drücke, und daß die Höhe, auf welche das Wasser hierbei steigen könne, von dem Druck der Luft abhänge. Zwar hatte schon etwa zwölf Jahre vorher Cartesius auf Grund ganz anderer, naturphilosophischer und mathematischer Arbeiten eine Idee von dem Vorhandensein und der Wirkung des Luftdruckes, durch welchen auch er schon die beschränkte Saughöhe der Pumpen erklärte; aber er entwickelte diese Idee nicht weiter und unternahm es nicht, sie durch Versuche zu beweisen und zu klären. Torricelli dagegen beschloß sofort, die Richtigkeit seiner Annahme durch das Experiment zu prüfen. Er schloß, daß Quecksilber, welches $13\frac{1}{2}$ mal so schwer als Wasser ist, durch den Luftdruck auf $\frac{1}{13\frac{1}{2}}$ der Höhe des Wassers gehoben werden müsse; er nahm eine genügend lange, an einem Ende zugeschmolzene Glasröhre, füllte sie mit Quecksilber, kehrte sie, das offene Ende mit dem Daumen geschlossen haltend, um und steckte dann das untere offene Ende in eine Schale mit Quecksilber. Die Quecksilbersäule sank, wie Torricelli richtig vorhergesagt hatte, so weit, daß sich nur eine 76 cm hohe Säule in der Röhre erhielt; darüber blieb ein luftleerer Raum. Hiermit war bewiesen, daß die alte Lehre von dem horror vacui unhaltbar sei, und zugleich war so das erste Barometer konstruiert.

Dieses Experiment machte zwar sehr großes Aufsehen, es wurde von den Gelehrten der alten Schule in hochwissenschaftlichen Erörterungen besprochen, welche den Versuch erklären sollten, aber es warf keineswegs ohne weiteres die alte, als unantastbar geltende Aristotelische Lehre über den Haufen. Der berühmte französische Gelehrte Pascal, der von dem Versuch hörte, gab zunächst entgegen Torricelli die Erklärung, daß der Abscheu der Natur vor dem leeren Raum begrenzt sei. Erst durch den heftigen Widerspruch der unbedingten Anhänger des horror vacui gegen diese Verdächtigung der Natur wurde er zu näheren Studien über diesen Gegenstand getrieben, und bald schloß er sich vollständig der Erklärung Torricellis an und wurde ein eifriger Verfechter derselben. Er fand sie nämlich durch die Beobachtung bestätigt, daß auf dem 1570 m hohen Berge Puy de Dôme bei Clermont das Quecksilber in dem Instrument nicht so hoch stieg, wie am Fuße desselben. Die Versuche und Beweise Pascals drangen jetzt durch und verhalfen der Lehre Torricellis zur Anerkennung.

Der Luftdruck beruht, wie schon oben beiläufig erwähnt, auf dem Gewichte der Luft. Derselbe ist allerdings im Vergleich zu allen festen und flüssigen Körpern sehr gering (1 l Luft wiegt 1,29 g, oder 1 cbm 1,29 kg), so daß man im gewöhnlichen Leben die Luft als gewichtslos betrachtet; durch die bedeutende Höhe der die Erde umgebenden Lufthülle summiert sich aber das Gewicht so, daß der Druck auf 1 qcm Fläche auf der Erdoberfläche 1,033 kg oder auf 1 qm das ansehnliche Gewicht von 10333 kg beträgt. Da die Luft vollkommen elastisch ist, so pflanzt sich dieser Druck nach allen Seiten gleichmäßig fort, ebenso wie wir es bei dem hydrostatischen Drucke gesehen haben; es werden also

nicht nur horizontale Flächen von oben nach unten, sondern sämtliche Gegenstände auf der Erde von allen Seiten gleichmäßig mit dem Drucke einer Atmosphäre gedrückt. Daß dieser ungeheure Druck für gewöhnlich keine wahrnehmbaren Wirkungen ausübt, daß wir ihn z. B. an unserem Körper gar nicht spüren, liegt eben daran, daß er ganz gleichmäßig von allen Seiten wirkt und sich so aufhebt. Mit derselben Stärke, mit der die Luft von außen auf unseren Körper drückt, findet ein Gegendruck von innen durch die in allen unseren Körperhöhlen und in allen Geweben befindliche Luft statt.

Da der Druck der atmosphärischen Luft nur von ihrem Gewicht herrührt, so muß der Luftdruck mit der Höhe über der Erdoberfläche abnehmen, da in größeren Höhen die Dicke der darüber befindlichen Luftschicht geringer ist. Der Luftdruck bietet dieselben Erscheinungen wie der hydrostatische Druck. Die Höhe der die Erde umhüllenden Luftschicht ist bisher nicht mit Sicherheit bestimmt worden; wenn die Luft überall gleich dicht und von gleicher Zusammensetzung wäre, so würde die Begrenzung der Atmosphäre nur 8000 m hoch liegen, da aber die Luft nach oben immer dünner und leichter wird, so ist die Höhe bedeutend größer. Es ist auch der Satz aufgestellt worden, in großen Höhen ändere sich die Zusammensetzung der Luft erheblich; der Gehalt an Wasserstoff, dem leichtesten aller Gase, welcher an der Erdoberfläche fast null ist, würde in großen Höhen bedeutender und schließlich vorherrschend. Auf Grund der Lichtbrechung und des Aufleuchtens von Sternschnuppen beim Eintreten in die irdische Atmosphäre hat man einen mittleren Wert für die Höhe der letzteren von etwa 225 km ausgerechnet.

Die Größe des Luftdruckes wird durch Barometer gemessen und zu Höhenmessungen und für meteorologische Zwecke benutzt. Weitere Ausführungen hierüber finden sich in dem zweiten Teile dieses Bandes.

Auftrieb der Luft. Ebenso wie nach den hydrostatischen Gesetzen jeder Körper im Wasser einen Gewichtsverlust oder Auftrieb erleidet, so findet auch durch die Luft ein Auftrieb statt; dieser ist allerdings so gering, daß er im gewöhnlichen Leben kaum bemerkt wird und für die meisten Fälle der Praxis vernachlässigt werden kann. Der Auftrieb ist ebenso wie bei Wasser gleich dem Gewichte einer Luftmenge von dem Volumen des Körpers; da, wie wir gesehen haben, das Gewicht von 1 cbm Luft unter gewöhnlichen Verhältnissen 1,29 kg beträgt, so ist der Auftrieb oder Gewichtsverlust für jeden Kubikmeter 1,29 kg oder pro Liter 1,29 g. Ein Körper von 1 kg Gewicht und einem großen Volumen erleidet also mehr Auftrieb als ein gleich schwerer Körper von geringem Rauminhalt, also größerem spezifischen Gewicht. Die häufig gestellte Scherzfrage: „Was ist schwerer, ein Pfund Blei oder ein Pfund Federn?“ gewinnt also unter Berücksichtigung dieses Umstandes eine gewisse Bedeutung. Ein Pfund Federn in der gewöhnlichen Weise, also in der Luft gewogen, ist nämlich thatsächlich schwerer als ein Pfund Blei, wenn man nämlich beide wissenschaftlich genau wiegt, d. h. ihre thatsächliche Masse unter Ausschluß des Auftriebes durch die Luft, also im luftleeren Raum. Das Beispiel wird noch klarer, wenn wir an Stelle der Federn einen kleinen Luftballon setzen; nach den gewöhnlichen Begriffen hat derselbe kein Gewicht, denn er drückt ja nicht auf seine Unterlage, er fällt nicht zur Erde, im Gegenteil, er steigt entgegen der Schwerkraft in die Höhe und würde, an einer feinen Wage befestigt, den einen Arm in die Höhe ziehen können. Thatsächlich hat aber selbstverständlich dieser Ballon ein Gewicht; man findet es durch Wägung im luftleeren Raume oder durch Rechnung, indem man den wirksamen Auftrieb, der an einer feinen Wage direkt gemessen werden kann, von dem Gewichte einer gleich großen Luftmenge abzieht. Wissenschaftliche genaue Wägungen werden deshalb, wie man sagt, auf den leeren Raum bezogen; nur so wird das wirkliche Gewicht der Masse des Körpers richtig bestimmt.

Auf dem Auftrieb in der Luft beruhen die Luftballons, und nach Vorstehendem ist die Steigkraft eines solchen leicht zu berechnen. Bei einem Luftballon von etwa 700 cbm Inhalt, wie sie jetzt meist verwendet werden, beträgt das Gewicht der Hülle, Gondel und Zubehör etwa 150 kg; bei Füllung mit Leuchtgas von einem spezifischen Gewichte (bezogen

auf Luft) von 0,40 ist das Gewicht des Gases 280 kg und das Gewicht der verdrängten Luftmenge 700 × 1,29 = rund 900 kg, der thatsächliche Auftrieb beträgt also 900 — (150 + 280) = 470 kg. Bei Füllung mit dem viel leichteren, aber teueren, reinen Wasserstoffgas (Gewicht eines cbm 0,09 kg) wäre der Auftrieb desselben Ballons hiernach 700 × (1,29 — 0,09) — 150 kg = 690 kg.

An Stelle der schon genannten Größe des atmosphärischen Luftdruckes von 1,033 kg pro 1 qcm nennt man im gewöhnlichen Leben und allgemein in der Technik das runde und bequeme Maß von 1 kg Druck pro 1 qcm als 1 Atmosphäre. In diesem Sinne entspricht also 1 Atmosphäre genau einer Wassersäule von 10 m, nicht von 10,33 m; die Größe des Druckes einer Atmosphäre in diesem technischen Sinne ist natürlich überall gleich und konstant, nicht wie diejenige des wirklichen Atmosphärendruckes schwankend und abhängig von der Höhenlage.



165. Otto von Guericke.

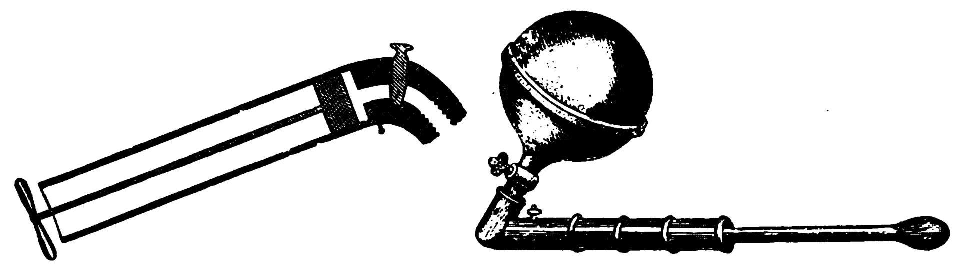
Guerickes Erfindung der Luftpumpe. Die häufig wiederkehrende Beobachtung, daß wichtige Entdeckungen oder Erfindungen fast gleichzeitig an verschiedenen Stellen gemacht werden, ohne daß die Entdecker Kenntnis von den Arbeiten der andern haben, ist auch bei der Entdeckung des Luftdruckes zu verzeichnen. Unabhängig von den Arbeiten Torricellis und Pascals, von denen er überhaupt erst später die ersten Nachrichten erhielt, hat der Deutsche Otto von Guericke den Luftdruck entdeckt. Guericke muß mit zu den hervorragenden Begründern der Physik und Mechanik gezählt werden; er hat in Deutschland in erster Linie mit dazu beigetragen, die Macht der alten scholastischen Gelehrsamkeit zu brechen und eine ganz andere Denk- und Anschauungsweise, eine wirkliche Naturwissenschaft an ihre Stelle zu setzen.

Otto von Guericke wurde 1602 zu Magdeburg geboren. Er studierte bereits in sehr jungen Jahren zu Leipzig und darauf in Jena Rechtswissenschaft; dann wandte er sich in Leiden dem Studium der Mathematik und Physik zu. Später wurde er in seiner Vaterstadt Ratsherr und erlebte die Eroberung Magdeburgs durch die Scharen Tillys mit; nachdem die Stadt wieder neu erstanden war, wurde er Bürgermeister derselben. Im Jahre 1686 starb er in Hamburg, wohin er sich einige Jahre vorher nach einem thaten- und erfolgreichen Leben zu seinem Sohne zurückgezogen hatte.

Guericke erkannte mit klarem Geiste, daß in höherem Maße als früher das Experiment in der Naturwissenschaft angewendet werden und an Stelle tiefsinniger, unklarer, philosophischer und dialektischer Streitigkeiten treten müsse. In dem Vorworte zu seinem Hauptwerke „De vacuo spatio“ (Über den leeren Raum) sagte er: „Die Redekunst, die Eleganz der Worte, sowie die Gewandtheit im Disputieren gelten nichts auf dem Gebiete der Naturwissenschaften“. Und doch hatte auch Otto von Guericke ebenso wie Galilei sich noch keineswegs ganz von dem Einflusse der naturphilosophischen Schule und der alten Weltanschauung frei zu machen gewußt. Seine wichtigen naturwissenschaftlichen

Arbeiten, besonders die Versuche über den leeren Raum, sind durch philosophische Kontroversen über das Vakuum veranlaßt worden. Sein Werk enthält eingemengt in die klare Naturwissenschaft noch manche unklare philosophische und auch theologische Betrachtungen, z. B. Spekulationen über den Raum des Himmels und den Ort der Hölle. Über die Natur der Luft hatte er noch ganz merkwürdige Ansichten, welche ihn aber nicht hinderten, ihre physikalischen Wirkungen richtig zu untersuchen und zu erkennen; er hielt die Luft für einen Duft, der den Körpern entweiche.

Die ersten Versuche Guerickes bezweckten, einen vollständig luftleeren Raum oder ein vollständiges Vakuum herzustellen, was von den Anhängern der alten Lehre als unmöglich, weil mit dem horror vacui im Widerspruch stehend, erklärt wurde. Er füllte zuerst ein möglichst gut ringsherum gedichtetes Faß ganz mit Wasser und ließ letzteres dann aus einer am tiefsten Punkte des Fasses angebrachten Röhre ausfließen; auf diese Weise sollte in dem Fasse ein völlig leerer Raum bleiben. Der Versuch mißglückte aber, denn durch die Poren des Holzes und die Fugen drang von allen Seiten Luft ein. Da Guericke durch wiederholte Versuche einsah, daß Holz zu porös sei, nahm er Metallkugeln; es gelang ihm, eine runde kupferne Hohlkugel mittels einer Pumpe so weit von Luft zu entleeren, daß beim Öffnen eines Hahnes von außen Luft unter Zischen mit Heftigkeit einströmte. Jetzt ging Guericke daran, einen besonderen neuen Apparat, die Luftpumpe, zu konstruieren. Die erste Ausführung derselben ist in den Abb. 166 u. 167 dargestellt. Der runde hohle Rezipient wurde auf einen



166. Otto von Guerickes erste Luftpumpe (Schnitt). 167. Guerickes Luftpumpe. Nach Gerland.

Pumpenstiefel aufgeschraubt, die Verbindung konnte durch einen Hahn geschlossen werden. In dem genau ausgebohrten Cylinder bewegte sich dicht ein Kolben mit Handgriff. Beim Ausziehen desselben wurde die Verbindung mit dem Rezipienten hergestellt, und die Luft strömte aus letzterem in den Stiefel. Dann wurde der Hahn geschlossen und durch Herausziehen eines Stiftes eine zweite, nach außen gehende Bohrung geöffnet; diese hatte den Zweck, die Luft aus dem Stiefel beim Zurückdrücken des Kolbens entweichen zu lassen. Nach einigen Hüben ging das Auspumpen der Luft so schwer, daß zwei Männer mit aller Kraft arbeiten mußten.

Dieses war die erste Luftpumpe von Guericke, von welcher sich noch ein Exemplar in der Königlichen Bibliothek in Berlin befindet. Bald verbesserte Guericke seine Erfindung und gab der Luftpumpe die Form, wie sie Abb. 168 darstellt. Der Pumpenstiefel trug oben eine Röhre, in welche die auszupumpenden Hohlkörper mit einem Hahn eingesteckt wurden. Die Bewegung des Pumpenkolbens geschieht durch den rechts vorstehenden Hebelarm, durch welchen eine größere Kraft entwickelt werden konnte, als bei direkt wirkendem Kolben. War der Rezipient auf das obere Ende des Stiefels aufgeschraubt, dann wurde der Trichter oben mit Wasser gefüllt, um eine bessere Dichtung zu erzielen. Guericke glaubte anfangs, er könnte mit seiner Luftpumpe ein vollkommenes Vakuum schaffen, jede Spur von Luft schließlich aus dem Rezipienten entfernen. Eine Probe zeigte ihm aber, daß dies nicht der Fall sei. Wenn er nämlich das entleerte Gefäß mit geschlossenem Hahn abnahm, in Wasser tauchte (mit dem Hahn nach unten) und dann den Hahn öffnete, dann drang zwar sehr schnell Wasser in den Hohlraum ein, aber ein kleiner Raum, etwa so groß wie eine Haselnuß, blieb frei, derselbe mußte also voll Luft

sein. Daß dies der Fall sein mußte, ist leicht einzusehen, denn bei jedem Pumpenhube wird die Luft im Rezipienten nur verdünnt; der Rest kann nie ganz entfernt werden, oder theoretisch nur nach unendlich vielen Hüben. Aber auch der Umstand ist in Betracht zu ziehen, daß der Kolben selbst, sowie die Ventile ja nicht vollkommen luftdicht arbeiten, besonders wenn das Vakuum schon ziemlich hoch getrieben ist. Guericke erkannte dies denn auch bald, und er erklärte selbst, daß „niemals die Luft vollständig, im mathematischen Sinne des Wortes, ausgeschlossen werden könnte; die Vorrichtungen der Sterblichen sind niemals mathematisch vollkommen, sondern geschehen, wenn auch auf mathematischer Grundlage, doch auf mechanischem Wege“. Hierin drückt sich schon eine klare Erkenntnis des Unterschiedes zwischen dem theoretisch Möglichen und dem praktisch Ausführbaren aus.

Guericke machte nun mit dem durch seine Luftpumpe hergestellten Vakuum die verschiedensten Beobachtungen; er fand, daß eine Glocke im Vakuum nicht mehr tönte, Tiere darin starben, aus Wasser Luftbläschen entwichen, brennende Kerzen verlöschten, Fische stark anschwollen, da die in ihrer Blase befindliche Luft, nachdem kein äußerer Gegendruck mehr wirkte, sich ausdehnte, während andre Fische aus der Blase Luft entweichen ließen. Er fand, daß Wasser in einer Röhre aus einem tiefer stehenden Behälter in den entleerten Rezipienten aufstieg. Um festzustellen, bis zu welcher Höhe dies geschehe, brachte er den Rezipienten in das zweite Stockwerk seines Hauses und führte die Röhre außen an der Mauer bis in ein auf dem Boden stehendes Gefäß: das Wasser stieg bis hinauf; er brachte den luftleeren Behälter in den dritten Stock: dieselbe Erscheinung wiederholte sich. Endlich, als es noch ein Stockwerk höher gestiegen war, blieb das Wasser in der Röhre stehen und stieg nicht höher; er stellte fest, daß dies bei einer Höhe von 19—19½ Magdeburger Ellen geschah. Aus diesem Versuche schloß Guericke richtig, „daß der horror vacui in dem Druck der atmosphärischen Luft besteht, welcher das Wasser, wo sich ein leerer Raum bietet, drängt, in diesen einzutreten und ihn auszufüllen, und zwar so hoch, als diesem Druck entspricht“. Guericke entdeckte auch die Schwankungen des Luftdruckes zu verschiedenen Zeiten, sowie einen Zusammenhang zwischen diesen und dem Wetter und konstruierte das erste Wetterglas. Im Jahre 1660 bemerkte er vor einem großen Sturme eine außerordentliche Abnahme des Luftdruckes: das Wettermännchen in seinem Wetterglase fiel in der Röhre unter den tiefsten Punkt der Skala. Guericke sagte, daß irgendwo ein schweres Unwetter herrschen müsse, und zwei Stunden später brach der Orkan über Magdeburg herein. Auch das Gewicht der Luft bestimmte Guericke, indem er einen großen Rezipienten, den er ausgepumpt hatte, an die Wage hing und die Gewichtszunahme bestimmte, nachdem Luft eingeströmt war. Am bekanntesten sind seine Versuche mit den Magdeburger Halbkugeln geworden, welche er auf dem Reichstage zu Regensburg, auf dem er als erster Bürgermeister von Magdeburg anwesend war, vor allen versammelten Reichsfürsten und dem Kaiser Ferdinand III. ausführte. Er ließ aus Kupfer zwei Halbkugeln von 67/100 Ellen Durchmesser anfertigen, die mit ihren Rändern genau aufeinander paßten. Nachdem er sie mit seiner Luftpumpe entleert hatte, vermochten je acht in entgegengesetzter Richtung an den beiden Hälften ziehende Pferde dieselben nicht, oder nur mit Aufbietung aller Kraft auseinanderzureißen, wobei ein Knall wie ein Büchsenschuß entstand.



168. Verbesserte Form der ersten Luftpumpe.

Das Mariottesche und das Gay-Lussacsche Gesetz. Die weitere Ausbildung der Gesetze der luftförmigen Körper erfolgte bald darauf durch den Engländer Robert

Boyle und den Franzosen **Mariotte**, die auf den Arbeiten von Torricelli und Guericke weiterbauten. Boyle lernte die Versuche Guerickes durch eine Veröffentlichung des Jesuitenvaters Schott, Professors der Physik zu Würzburg, kennen und setzte dieselben alsbald fort. Boyle war ein eigentümlicher Gelehrter; er teilte seine Zeit zwischen theologischen und naturwissenschaftlichen Studien, und die letzteren haben recht bedeutsame Erfolge, besonders durch viele neue und treffliche Experimente und Beobachtungen gehabt. Er fand, daß eine kleine, in dem kürzeren, oben geschlossenen Schenkel eines U-förmigen Rohres abgeschlossene Luftmenge durch eine in den anderen Schenkel gebrachte Quecksilbersäule in demselben Verhältnis kleiner, also verdichtet wurde, wie das Gewicht der Quecksilbersäule wuchs, und damit fand er das Gesetz, daß das Volumen einer Luftmenge im umgekehrten Verhältnis zu ihrer Dichtigkeit oder ihrem Drucke steht. Es wurde aber wenig bekannt; fast 30 Jahre später (1679) fand es der Pariser Akademiker **Mariotte** auf anderem Wege nochmals, und nach ihm ist es benannt worden. Das Mariottesche Gesetz ist nur richtig, wenn die Temperatur der zusammengedrückten Luft dieselbe bleibt; bei Temperaturänderungen finden andere Gesetzmäßigkeiten statt, **Gay-Lussac** (1778—1850) stellte das nach ihm benannte wichtige Gesetz dafür auf. Schon lange vor ihm hatte ein Kollege Mariottes, Amonton zu Paris (1703), die Gesetze über die Abhängigkeit eines Gasvolumens von seiner Temperatur, wenn der Druck oder die Spannung dieselbe bleibt, gefunden; diese Arbeit blieb indessen fast gänzlich unbekannt. Das Gay-Lussacsche Gesetz besagt, daß bei gleichem Drucke die Zunahme des Volumens eines Gases der Zunahme der Temperatur proportional sei. Ferner fand Gay-Lussac, daß diese Zunahme für die verschiedenen Gase nahezu die gleiche ist und für 1° C. 0,00375 des Volumens bei 0° beträgt; durch spätere Untersuchungen sind die genaueren Werte für die verschiedenen Gase und verschiedenen Temperaturen bestimmt worden. Aus diesem Gesetze folgt, daß bei gleichem Volumen der Druck eines Gases proportional der Temperaturzunahme wächst und bei Temperaturabnahme fällt. Die Kombination des Mariotteschen und des Gay-Lussacschen Gesetzes gibt die Beziehungen zwischen Volumen, Druck und Temperatur der luftförmigen Körper.

Manometer, Vakumeter, Barometer. Apparate zum Messen des Druckes von Luft oder Gasen heißen **Manometer**, wenn der Druck höher ist als der atmosphärische, oder **Vakumeter**, wenn der Druck geringer ist. Zur Messung des atmosphärischen Luftdruckes dienende Manometer heißen **Barometer**.

Von den verschiedenen Arten Druckmessern beruhen die **Flüssigkeitsmanometer** und die Quecksilberbarometer auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren oder des hydrostatischen Druckes. Wenn die beiden Schenkel des U-Rohres (Abb. 169) offen sind, so steht die Flüssigkeit in denselben gleich hoch; wird aber der eine Schenkel an einen Behälter mit gepreßter Luft oder mit einem Dampfkessel in Verbindung gesetzt, so erfährt die Flüssigkeit in diesem Schenkel einen höheren Druck. Der Flüssigkeitsspiegel sinkt in dieser Röhre und steigt in dem anderen Schenkel, bis der Druck der Flüssigkeitssäule mit dem Luft- oder Dampfdruck im Gleichgewicht steht. Beträgt dieser z. B. eine Atmosphäre Überdruck, d. h. Mehrdruck gegen den atmosphärischen Luftdruck, so steht eine Wassersäule in dem einen Schenkel 10,33 m höher als im anderen, oder bei Quecksilber 76 cm. In der Technik versteht man, wie schon erwähnt, unter einer Atmosphäre Druck gewöhnlich nicht den wirklichen Druck der Atmosphäre, sondern das abgerundete Maß von 10 kg pro 1 qcm, und wenn man von einer Atmosphäre Druck spricht, so ist damit nicht der absolute Druck (verglichen mit dem drucklosen luftleeren Raum), sondern der Überdruck gegen den Luftdruck gemeint; 4 Atmosphären Dampfdruck bedeutet also 40 kg Druck pro qcm mehr als der Atmosphärendruck. Man bezeichnet den Druck auch statt mit Atmosphären mit der Höhe der Wassersäule oder der Quecksilbersäule, der er das Gleichgewicht hält, also z. B. statt zwei Atmosphären 20 m Wassersäule oder 152 cm Quecksilbersäule. Allgemein ist dies üblich bei Bezeichnung der Größe eines Vakuums; man sagt nicht, das Vakuum ist gleich ½ Atmosphäre, sondern kurz ein Vakuum von 38 cm Quecksilber. Für Vakuummessungen, sowie kleinere Drucke ist das einfache Manometer mit einem offenen Schenkel (Abb. 169) ganz bequem; man kann an einer Skala oder mit einem Maßstabe direkt

den Druck messen. Solche einfache, mit gefärbtem Wasser gefüllte Manometer werden z. B. allgemein zur Messung des geringen Druckes des Gases in Gasanstalten angewendet; alle Apparate werden mit solchen verbunden, und man sagt z. B., der Gasbehälter gibt 80 mm Druck, d. h. also die Gasspannung hält einer Wassersäule von 80 mm Höhe das Gleichgewicht.

Ein einfaches Manometer für geringe Drucke von anderer Form, wie sie auch vielfach in Gasanstalten angewendet werden, zeigt Abb. 170; das innere Glasrohr ist mit dem äußeren oben zusammengeschmolzen. Durch eine Öffnung am unteren Ende des inneren Rohres stehen beide in Verbindung; außerdem ist das weite Rohr bei a durch Gummischlauch an die Gasleitung oder irgend einen Apparat angeschlossen, während das enge Rohr oben offen ist, also unter dem äußeren Luftdruck steht. Der Überdruck oder auch Unterdruck des Gases gegen letzteren ist direkt an der Skala in der Höhe der Wassersäule abzulesen.



169. Gewöhnliches Flüssigkeitsmanometer.

170. Manometer für Gasanstalten.

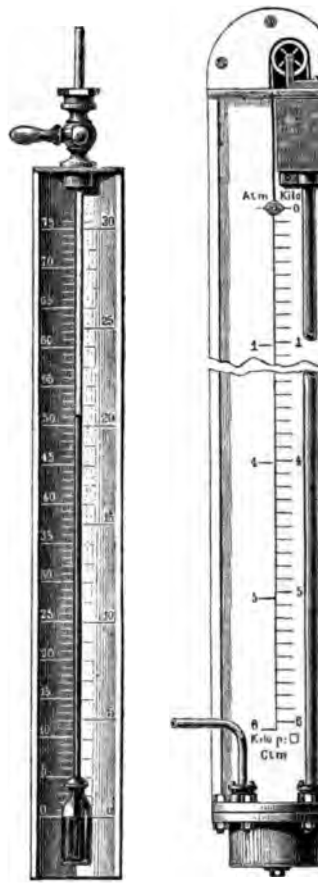
Das Vakuum in den Kondensatoren der Kondensationsdampfmaschine wird meist mit Quecksilbervakumetern gemessen. Abb. 171 zeigt ein solches; hier ist das Glasrohr nicht U-förmig gebogen, sondern es steht mit seinem unteren Ende in einer mit Quecksilber gefüllten Flasche, welche durch ein Loch in dem Stöpsel mit der Luft in Verbindung steht. Es ist klar, daß dieses Gefäß genau so wirkt, wie der andere Schenkel eines U-Rohres. Das lange Rohr ist an den Kondensator angeschlossen; durch das in diesem herrschende Vakuum drückt die äußere Luft das Quecksilber in die Höhe, und an einer Skala liest man bei dem Quecksilberstande direkt das Vakuum ab. Statt des Quecksilbers könnte man auch hier Wasser nehmen, doch würde dies unbequem sein, da z. B. statt 65 cm Quecksilbersäule die Wassersäule etwa $8^1/_2$ m hoch sein würde. — Ebenso wird das Vakuum, oder, wie man sagt, der Zug in Schornsteinen gemessen; da dieser stets sehr gering ist, so wird hierbei statt Quecksilber Wasser angewendet, und man sagt z. B., der Schornstein hat einen Zug von 12 mm (nämlich Wassersäule). Statt des zerbrechlichen Glases kann man für offene Flüssigkeitsmanometer auch Eisenröhren verwenden. Um hierbei den nicht sichtbaren Flüssigkeitsspiegel im Rohre zu markieren, wendet man Schwimmer an; Abb. 172 zeigt eine solche Anordnung. Unten ist das Gefäß an die Druckleitung angeschlossen. Das Wasser oder Quecksilber in dem langen Eisenrohr trägt einen Schwimmer, der durch eine über eine Rolle laufende Schnur seine Auf- und Abwärtsbewegungen auf einen Zeiger überträgt, welcher an der Skala sich vorbeibewegt. Die Bezeichnung der letzteren ist also umgekehrt wie bei direkter Ablesung: bei höherem Druck steigt das Quecksilber, aber der Zeiger sinkt; die Skala geht also von oben nach unten.

Die zur Messung und Beobachtung des atmosphärischen Luftdruckes dienenden Quecksilberbarometer werden in einem späteren Teile dieses Bandes im Zusammenhange mit anderen meteorologischen Meßinstrumenten und Meßmethoden näher besprochen.

Für größere Drucke, wie sie in der Technik vielfach vorkommen, z. B. 6—8 Atmosphären in Dampfkesseln, Druckluftanlagen u. s. w., würden die an einer Seite offenen Wasser- und Quecksilbermanometer zu hoch werden; um dies zu vermeiden, wendet man das Mariottesche Gesetz an. Wird nämlich der eine Schenkel des Manometers oben geschlossen, so komprimiert die steigende Wasser- oder Quecksilbersäule die darüber befindliche Luft im Verhältnis des Druckes, der auf dem anderen Schenkel ruht. Ist z. B. der mit Luft gefüllte Raum über der Flüssigkeit ohne Druck (d. h. unter dem atmosphärischen Luftdruck) 20 cm hoch, so wird die Luft bei einer Atmosphäre Überdruck auf die Hälfte,

10 cm, zusammengedrückt; bei zwei Atmosphären Überdruck (= 3 Atmosphären absolut) auf $6^2/_3$ cm, bei drei Atmosphären auf 5 cm u. s. w. Dies ist nicht ganz richtig, denn es muß auch noch die Höhe der steigenden Flüssigkeitssäule berücksichtigt und hiernach die Skala, an welcher die Drucke abzulesen sind, eingeteilt werden. Die Teilung der Skala wird mit wachsendem Drucke nach oben immer kleiner, und man kann auf diese Weise beliebig große Drucke messen, da die Flüssigkeit nie ganz bis oben steigen kann; praktisch ist allerdings dadurch eine Grenze gesetzt, daß bei steigendem Druck schließlich die Glasröhre platzen würde.

Eine andere Anwendung des Mariotteschen Gesetzes ist ein sehr einfacher und zuverlässiger Apparat, um die schwankende Höhe von Wasserständen an entfernten Stellen anzuzeigen. Abb. 173 zeigt einen solchen pneumatischen Wasserstandszeiger, auch Hydrometer genannt. Auf den Boden eines Wasserbehälters, Brunnens oder Reservoirs wird die unten offene Luftglocke A senkrecht hinabgelassen, so daß die Luft darin bleibt. An dieselbe ist oben eine enge Rohrleitung angeschlossen, welche anderseits mit einem Manometer in Verbindung steht. Der Wasserstand drückt die Luft in der Glocke zusammen, und der Druck pflanzt sich durch die Rohrleitung fort; jedes Steigen oder Fallen des Wasserstandes ruft eine bestimmte Veränderung in der Luftspannung hervor, und diese wirkt auf das Manometer, so daß an der entsprechend eingeteilten Skala des letzteren direkt die Schwankungen des Wasserspiegels abgelesen werden können. In der Abbildung ist ein Federmanometer gezeichnet; ebenso könnte ein Quecksilbermanometer angewandt werden. Für das richtige Funktionieren ist es natürlich notwendig, daß die Luftleitung vollständig dicht ist, denn wenn die gepreßte Luft teilweise entweichen würde, wären die Angaben des Apparates falsch. Solche Hydrometer werden vielfach angewendet, z. B. bei Wasserwerken, um den Stand der Brunnen und der Wasserreservoire in dem entfernten Maschinenraume sichtbar zu machen.



171. Quecksilbervakumeter. 172. Manometer mit Rolle.

An Stelle der besprochenen Flüssigkeits- oder Luftmanometer wendet man seit längerer Zeit mehr und mehr die bequemeren Metallmanometer an. Es gibt zwei Arten derselben; die eine Konstruktion beruht darauf, daß eine gekrümmte, dünnwandige, elastische Metallröhre sich streckt, wenn sie einen größeren inneren Druck erhält, und sich wieder mehr krümmt, wenn der Druck nachläßt. Diese Metallmanometer werden vielfach auch Bourdonsche Manometer genannt, obwohl Bourdon das Verdienst der Erfindung nicht beanspruchen kann, da er eine Erfindung des deutschen Ingenieurs Schinz nachahmte. Das sogenannte Bourdonsche Metallmanometer (Abb. 174) besteht in der Hauptsache aus einer in einer Kapsel befindlichen, im Kreise gebogenen Metallröhre, die an einem Ende (rechts) geschlossen ist, während das andere Ende durch eine Bohrung in dem Gehäuse mit der Dampf- oder Druckluftleitung in Verbindung steht; dieses Ende liegt also fest, während jenes durch eine Stange an einen beweglichen, leichten Hebelarm angeschlossen ist. Der Hebel trägt am anderen Ende einen gezahnten Kreissektor, welcher in ein Zahnrad eingreift; letzteres sitzt auf einer zentralen Achse, die einen langen Zeiger trägt. Der ganze Mechanismus ist nach vorn durch eine Glasplatte geschlossen; hinter dem Zeiger liegt eine am Umfange mit einer Skala versehene Scheibe, ähnlich dem Zifferblatt einer Uhr. Wenn in der hohlen Röhre

kein Druck herrscht, so steht der Zeiger auf 0. Wird nun die Druckleitung angeschlossen, so dehnt sich die Röhre aus und zieht mit dem beweglichen Ende an dem Hebelarm; dieser überträgt die Bewegung durch das Zahnsegment auf die Zeigerachse und der Zeiger dreht sich nach rechts herum, an der Skala den Druck angebend. Umgekehrt geht der Zeiger zurück, wenn der Druck nachläßt. Genau dieselbe Konstruktion hat das Bourdonsche Aneroidbarometer; für die Messung der im Verhältnis zu den in der Technik angewandten Manometern geringen Schwankungen des atmosphärischen Luftdruckes müssen dieselben natürlich besonders fein und genau gearbeitet sein.

Etwas anders ist das von dem deutschen Ingenieur Schäffer erfundene Metallmanometer, welches dem Aneroidbarometer von Vidi nachgebildet ist. Der Druck wirkt hier nicht auf eine hohle Röhre, sondern auf eine dünne, bewegliche Metallplatte. An der Abb. 175 ist die Konstruktion und Wirksamkeit ersichtlich. Zwischen dem Anschlußstück G der Dampfleitung und deren Anschlußflansche der oberen Kapsel ist ein ellipsoider hohler Raum gebildet; der-



173. Pneumatischer Wasserstandszeiger.



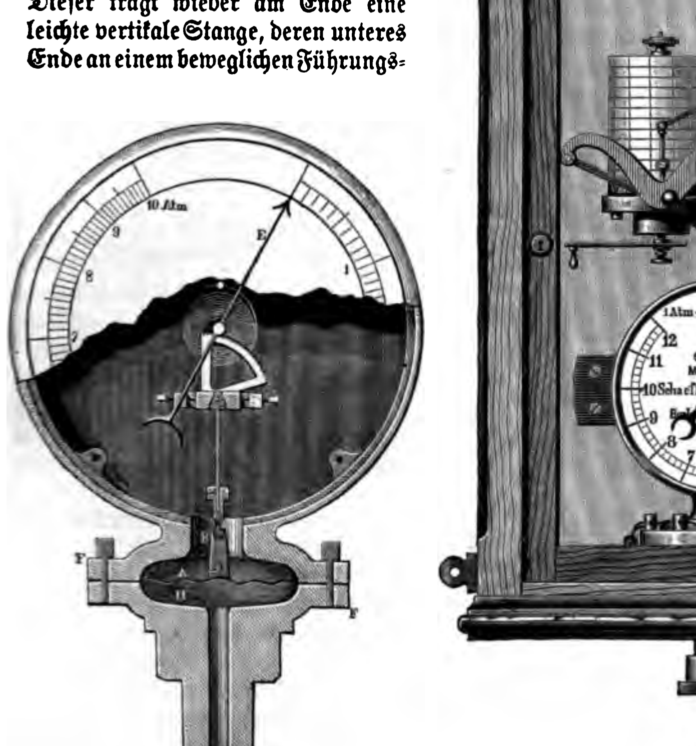
174. Bourdonsches Metallmanometer.

selbe ist nach oben durch eine zwischen den Flanschen F eingespannte dünne Metallplatte luftdicht verschlossen. Der Raum A über der Platte steht mit dem Innern des Gehäuses und der äußeren Luft in Verbindung, in die untere Hälfte H tritt der Dampf ein. Dringt derselbe nun von unten gegen die Platte, so drückt diese sich, entgegen ihrer Elastizität, je nach der Größe des Druckes mehr oder weniger durch. Die Bewegung wird durch die Stange B und einen gezahnten Kreissektor, ähnlich wie bei der vorigen Konstruktion, auf die Zeiger übertragen. Bei jedem Nachlassen des Dampfdruckes geht die Platte infolge ihrer Elastizität wieder zurück.

Metallmanometer können ebenso wie für Dampf oder gepreßte Luft auch für Wasser angewendet werden, und bei städtischen Wasserleitungen sowie Druckwasseranlagen werden sie in der Thar sehr vielfach gebraucht.

Sehr schöne und für manche Zwecke vorzügliche Apparate sind die in neuerer Zeit erfundenen Manometer mit graphischer Darstellung des Druckes unter Angabe der Zeit; Abb. 176 stellt einen solchen selbstregistrierenden Manometer von Schäffer & Budenberg in Buckau-Magdeburg dar. Der untere Teil entspricht einem gewöhnlichen Metallmanometer; unten ist die Druckleitung (Dampf-, Luft- oder Wasserdruckleitung). Auf

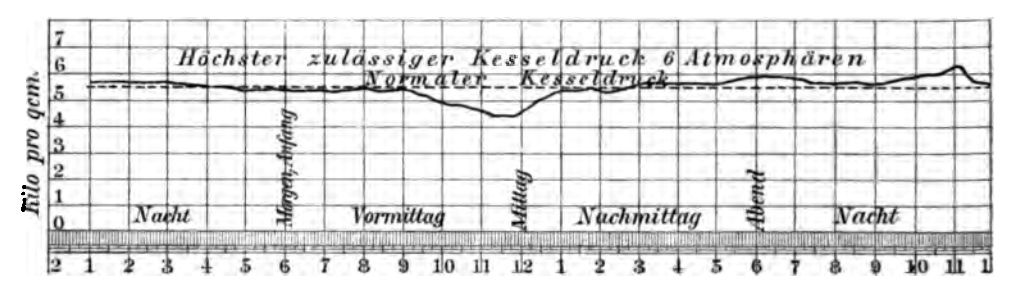
einem metallenen Gestell, an dem auch die Manometerkapsel befestigt ist, sitzt eine senkrechte, cylindrische, hohle Metalltrommel, um eine feste Achse leicht drehbar. In derselben ist eine Uhr untergebracht, welche die Trommel in Drehung versetzt, meist in der Weise, daß sie sich gerade in 24 Stunden einmal ganz umdreht. Um die Trommel wird ein in Abb. 177 in größerem Maßstabe als in Abb. 176 abgebildetes Papier gespannt, welches in gleichen Abständen in 24 Vertikalstreifen geteilt ist; die Linien sind am unteren Rande mit den Tages- und Nachtstunden bezeichnet. Ebenso hat es eine Einteilung in horizontale Streifen. Die Bewegungen des Hebelwerkes in dem Manometergehäuse werden durch eine in der senkrechten Säule befindliche Stange auf den oben sichtbaren dünnen Hebel übertragen. Dieser trägt wieder am Ende eine leichte vertikale Stange, deren unteres Ende an einem beweglichen Führungs-



175. Schäffers Metallmanometer. 176. Selbstregistrierendes Manometer.

arm befestigt ist, so daß sie nur der Auf- und Abbewegung des oberen Hebels folgen, aber nicht seitlich ausschlagen kann. Diese leichte vertikale Stange trägt in der Mitte einen Schreibstift, welcher durch eine leichte Feder oder eine andere Einstellung mit der Spitze gerade leicht auf das Papierblatt der Trommel drückt. Der Schreibstift ist entweder ein Glasröhrchen mit fein ausgezogener Spitze, welches aus einem kleinen Gläschen Tinte zugeführt erhält, oder häufig auch nur ein Metallstift; in letzterem Falle ist das Papier besonders präpariert, so daß beim Streichen mit dem Metallstift eine deutlich sichtbare Linie entsteht, wie eine Bleistiftlinie. Die Wirkungsweise ist nun folgende. Die Trommel dreht sich, das Papier bewegt sich also an dem Schreibstift vorbei, und wenn dieser sich nicht bewegt, so wird in 24 Stunden auf dem Papier eine horizontale Linie verzeichnet. Wird nun aber das Manometer in Thätigkeit gesetzt, also unten der Hahn des Druckrohres geöffnet, so bewegt sich der obere Hebel mit dem Schreibstift je nach dem Drucke in die Höhe.

Die Hebelübertragung und die Einteilung des Papieres passen nun so zusammen, daß der Druck der Atmosphäreneinteilung des Papieres entspricht; bei 4 Atmosphären hebt sich also der Stift so weit, daß er auf der horizontalen Linie 4 Atmosphären steht. Der Stift folgt allen Schwankungen des Druckes und verzeichnet auf dem sich langsam an ihm vorbeidrehenden Papier eine bestimmte Linie; wird z. B. der Druck genau auf $5^1/_2$ Atmosphären erhalten, so wird die Linie genau die punktiert markierte, vorgezeichnete Linie „normaler Kesseldruck" bei $5^1/_2$ decken. Natürlich muß der Stift, wenn das Manometer ohne Druck ist, auf der 0=Linie stehen. Man stellt z. B. morgens um 6 Uhr den Apparat so ein, daß der Stift auf der vertikalen 6 Uhr=Linie steht. Nach 24 Stunden kann man an dem abgenommenen Papier genau sehen, wie groß der Druck zu jeder Zeit während der verflossenen 24 Stunden gewesen ist. In der Abb. 177 ist die Linie, die der Stift beschrieben hat, stärker ausgezogen. Es ist daraus zu ersehen, daß einmal auf kurze Zeit der Druck den zulässigen höchsten Kesseldruck von 6 Atmosphären um 11 Uhr nachts überschritten hat; der Kesselwärter hat also nicht aufgepaßt und kann auf die Angabe dieses stummen, unbestechlichen und unbedingt zuverlässigen Zeugen zur Verantwortung gezogen werden. Von vormittags 10—12 Uhr hingegen war der Druck viel geringer als der dem Heizer vorgeschriebene normale von $5^1/_2$ Atmosphären; wenn dies nicht durch besonders starke Inanspruchnahme des Kessels in dieser Zeit erklärt werden kann, so ist das Feuer nicht genügend unterhalten worden.



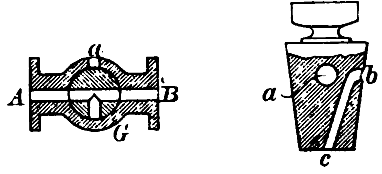
177. Diagramm zum selbstregistrierenden Manometer.

Es ist aus diesen Darlegungen ohne weiteres ersichtlich, wo und zu welchen Zwecken der Apparat vorteilhaft zu verwenden ist, zur laufenden Kontrolle von Kesselwärtern, zur laufenden Bestimmung der Druckverhältnisse in städtischen Wasserleitungen u. s. w. Besonders zu letzterem Zwecke wird das selbstregistrierende Manometer vielfach verwendet.

Neuere Luftpumpen. Nach Otto von Guericke sind die Luftpumpen vielfach verbessert worden, in der Konstruktion sowohl, wie durch bessere Arbeitsmethoden und Werkzeuge in der Ausführung. Man unterscheidet zunächst **Kolbenluftpumpen** oder Saugluftpumpen und die auf dem Torricellischen Versuche beruhenden Verdrängungsluftpumpen; von letzteren sind besonders die **Quecksilberluftpumpen** wichtig. Unter den Kolbenluftpumpen gibt es Hahn= und Ventilluftpumpen; die erste Konstruktion von Guericke war, wie wir gesehen haben, eine Hahnluftpumpe. Die Ventilluftpumpen haben nun, ähnlich wie Wasserpumpen, zwei leichtbewegliche und doch möglichst dicht schließende Ventile, ein Saugventil am Boden des Pumpenstiefels und ein leichtes Druckventil am Kolben; jede gut gearbeitete Wasserpumpe ist auch eine Luftpumpe.

Bei den Hahnluftpumpen wendet man allgemein besondere Hähne mit doppelter Bohrung an, durch welche die bei der Guerickeschen Luftpumpe erwähnte, besondere zweite Bohrung zum Auslassen der Luft beim Niedergange des Kolbens vermieden wird. Ein solcher Hahn ist der gewöhnliche Dreiwegehahn, der in Abb. 178 im Querschnitt dargestellt ist. Das Hahngehäuse G hat außer dem Hauptdurchgang eine seitliche Bohrung a, die den Innenraum mit der äußeren Luft verbindet. Ebenso hat der Hahnkegel (das Küken) eine zweite Bohrung, die durch die halbe Dicke desselben hindurchgeht, also von dem Durchgangskanal nach außen. Ist nun bei A der Anschluß an den Rezipienten,

bei B an den Pumpenstiefel, so wird in der gezeichneten Stellung beim Ausziehen des Kolbens Luft aus dem Rezipienten durch den Hahn in den Stiefel eingesogen, während der Kanal a im Hahngehäuse geschlossen ist. Vor dem Rückgange des Kolbens wird nun der Hahn $^1/_4$ linksherum gedreht; dadurch wird der Kanal nach dem Rezipienten geschlossen, dagegen durch die halbe Bohrung im Küken und den Kanal a im Hahngehäuse eine Verbindung von dem Pumpenstiefel nach außen zum Austreten der Luft geöffnet. Ganz ebenso wirkt die Hahnform Abb. 179. Durch die Bohrung a wird die Durchgangsverbindung zwischen Rezipient und Stiefel hergestellt; bei $^1/_4$ Drehung wird dagegen die Verbindung nach dem Rezipienten geschlossen und dem Pumpenstiefel durch die schräge Längsbohrung b c ein Kanal nach außen geöffnet.

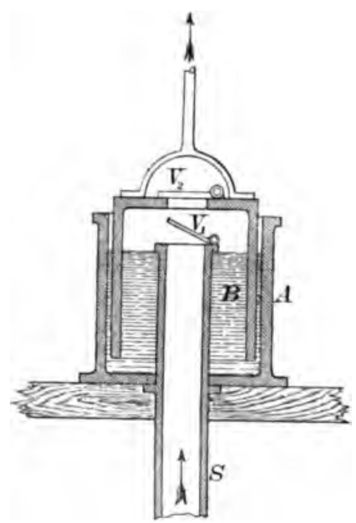


178 u. 179. Dreiwegehähne für Luftpumpe.

An die Stelle der alten einstiefeligen ist schon seit langer Zeit die **zweistiefelige Luftpumpe** getreten; wie aus der Abb. 180 ersichtlich, hat eine solche zwei nebeneinander liegende Stiefel aus Messing, oder für Demonstrationszwecke auch aus Glas, wie in der Abbildung.

Dieselben stehen mit einem gemeinschaftlichen Saugkanal in Verbindung, der durch die horizontale Verbindungsplatte und die runde Säule nach dem Rezipienten führt. Die Kolben sitzen an je einer vertikalen Zahnstange; beide Zahnstangen greifen an den entgegengesetzten Seiten in ein kleines Zahnrad ein, und die Welle des letzteren kann durch einen zweiarmigen Hebel mit Handgriffen in abwechselnde Rechts- und Linksdrehung versetzt werden. Hierbei wird stets gleichzeitig der eine Kolben nach unten, der andere nach oben bewegt; die Luftpumpe ist also doppeltwirkend. Der Rezipient, meist eine Glasglocke, steht mit seinem abgeschliffenen Rande auf einer genau abgeschliffenen Messingplatte, die in der Mitte eine Bohrung hat, die in den erwähnten Saugkanal mündet. Die Dichtung der Glocke gegen den Teller geschieht durch eine dünne Fettschicht, die man unter den Glockenrand streicht, worauf die Glocke fest mit einer kleinen Drehung aufgesetzt wird. Die Wirksamkeit einer Luftpumpe ist abhängig von der Genauigkeit, mit der Kolben und Ventile, bezw. der Hahn schließen, und von dem sogenannten schädlichen Raum. Dies ist derjenige kleine Raum, der zwischen dem ganz herabgedrückten Kolben und der Absperrung des Rezipienten bleibt, der nie ganz beseitigt werden kann und besonders bei Ventilluftpumpen auftritt. In diesem Raum bleibt nach dem vollständigen Niedergehen des Kolbens eine geringe Menge Luft, welche nach Öffnen des Kanals nach dem Rezipienten alsbald in diesen zurückströmt.

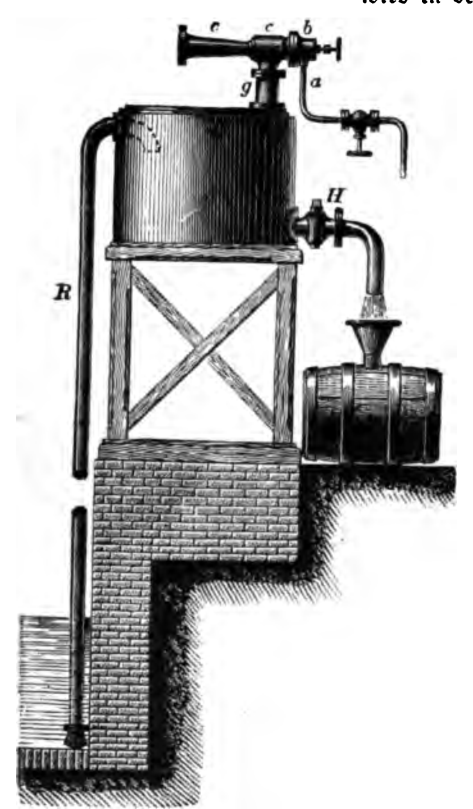

180. Zweistiefelige Luftpumpe.



181. Wasserkastenluftpumpe.

An der abgebildeten Luftpumpe ist noch ein Quecksilbervakumeter angebracht, zur Messung der Luftverdünnung.

Sehr alte Luftpumpeneinrichtungen von einer ganz anderen Konstruktion als die Stiefelluftpumpen sind die Bretterſätze oder Wasserkastenluftpumpen, wie sie in den Bergwerken, z. B. bei dem alten Harzer Bergbau, zur Ventilation oder Wetterführung der Schächte und Stollen benutzt wurden. Sie beruhen auf demselben Prinzip, wie die Kolbenluftpumpen, nämlich der Expandierung der Luft, sobald sie einen größeren Raum ausfüllen kann. Abb. 181 zeigt eine solche Einrichtung. A ist ein großes feststehendes, mit Wasser gefülltes, oben offenes Gefäß; in dieses taucht das unten offene, etwas kleinere Gefäß B ein, welches von oben durch einen Balancier oder ein Kunstkreuz, Winkelhebel, an dessen einem Arm die Maschinenkraft arbeitet, während der andere auf- und abgehend Arbeit verrichtet, z. B. eine Pumpe betreibt, direkt oder mittels Gestänge auf und ab bewegt wird in dem Maße, daß der untere Rand nicht auf den Boden stößt und auch nicht aus dem Wasser herausgehoben wird. Durch den Boden des unteren Wasserkastens ist ein Rohr S hindurchgeführt, welches über dem Wasserspiegel mündet und am oberen Ende eine Ventilklappe V_1 trägt, die sich nach außen öffnet. Eine ebenfalls nach oben schlagende Ventilklappe V_2 ist in dem Deckel von B. Das Rohr S ist hinabgeführt bis zu den Stollen des Baues, von welchen schlechte Luft abgesaugt werden soll. Wird nun das Gefäß B in die Höhe gezogen, so wird in demselben die Luft verdünnt, und deshalb steigt durch das Saugrohr S die Luft von unten nach, indem sich die Klappe V_1 öffnet; beim Niedergehen von B hingegen schließt sich diese sofort wieder, und der Luftinhalt wird durch die sich jetzt nach außen öffnende Klappe V_2 hinausgedrückt.



182. Dampfstrahlluftsauger zum Überheben von Teer.

Auch die früher eingehender beschriebenen Strahlpumpen können als Luftpumpen dienen und werden als solche vielfach verwendet. Mit demselben Strahlapparate, an dem in Abb. 148 die Wirksamkeit erklärt wurde, kann durch den Saugstutzen statt Wasser Luft angesaugt und eine fast vollständige Luftleere erzeugt werden. Die Apparate heißen für diese Verwendung Ejektoren. Sie werden sehr viel bei den früher besprochenen Zentrifugalpumpen angewendet, indem sie auf den höchsten Punkt des Gehäuses aufgesetzt werden und die Luft aus dem Saugrohr absaugen, so daß das Wasser nachsteigt und die Pumpe anfüllt; wenn der Ejektor Wasser auswirft, dann kann die Pumpe in Betrieb gesetzt und der Ejektor abgestellt werden. Die Ejektoren dienen ferner zum Ansaugen von Heberleitungen, langen Saugleitungen von Pumpen, zum Entlüften von Windkesseln u. s. w. Ebenso

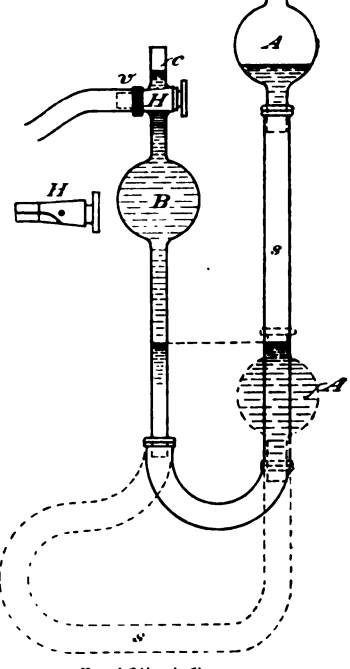
wie für Wasser kann auch für Luft gespannter Wasserdampf, Druckluft oder Druckwasser als Betriebsmittel angewendet werden. Die Ejektoren werden in der Industrie zu den verschiedensten Zwecken verwendet, so z. B. zum Heben und Überfüllen von dicken oder mit vielen festen Verunreinigungen versetzten Flüssigkeiten, Schlammmassen, Fäkalien und dergl., welche sich schlecht mit Kolbenpumpen heben lassen, da sie leicht die Ventile verstopfen, oder auch für saure, ätzende Flüssigkeiten oder Laugen, die das Metall der Pumpen angreifen würden, und bei denen die beschriebenen Dampf- oder Wasserstrahlelevatoren nicht angewendet werden können, weil sie nicht erwärmt oder verdünnt werden dürfen. In solchen Fällen saugt man durch einen Ejektor einen Behälter luftleer (s. Abb. 182), die Flüssigkeit steigt durch das Rohr R in die Höhe und füllt denselben, worauf der Inhalt durch den Hahn H abgefüllt werden kann. In der Abbildung sitzt der Ejektor c mittels des Rohrstutzens g auf einem eisernen, luftdichten Kasten, a ist das Betriebsdampfrohr, b die Einströmung mit Regulierventil und bei e bläst der Dampf mit der angesaugten Luft aus.



183. Körtings Dampfstrahlluftsauger für Abortentleerung.

Eine derartige Anordnung eignet sich sehr gut zur Entleerung von Aborten, wenn ein Dampfkessel vorhanden ist. Die Unbequemlichkeiten, welche eine solche Arbeit sonst mit sich bringt, werden hierdurch sehr vermindert; der auf das möglichst dichte hölzerne Latrinenfaß oder einen besonderen eisernen Wagenkasten gesetzte Ejektor saugt den Innenraum luftleer, welcher sich sogleich in sehr kurzer Zeit mit dem Grubeninhalt füllt. Die Abb. 183 zeigt eine solche höchst einfache Anwendung des Dampfstrahl-Luftsaugers. Zur Grubenabfuhr in Städten werden besondere, auf Wagen fahrbare kleine Dampfkessel verwendet, welche den Betriebsdampf für den Ejektor liefern.

Die Quecksilberluftpumpen. Dieselben sind nach dem Vorbilde des Torricellischen Versuches konstruiert; die einfachste Form stellt Abb. 184 schematisch dar. Das oben offene, unten mit einem Hals versehene Glasgefäß A ist durch den Kautschukschlauch s mit dem unteren Ende des Glasgefäßes B verbunden. Der obere Hals c des letzteren ist mit einem eingeschliffenen Dreiwegehahn H versehen, der so gebohrt ist, daß das Gefäß B mit dem Halse c, also der äußeren Luft, oder durch den Anschluß v mit dem zu leerenden Rezipienten in Verbindung gesetzt werden kann, bei Abschluß nach außen. Man hebt zuerst bei nach außen geöffnetem Hahn das Gefäß A so hoch, daß das in genügender Menge eingefüllte Quecksilber in dem mit A kommunizierenden Gefäße B bis oben über den Hahn H hinaussteigt, wobei die Luft durch c ausgetrieben wird. Dann stellt man die Hahnverbindung B v her und senkt das Gefäß A (punktierte Lage in der Abbildung); das Quecksilber tritt aus B nach A über, und über dem Quecksilber entsteht in dem Raume B die Torricellische Leere, so daß



184. Quecksilberluftpumpe.

die Luft aus dem Rezipienten unter Verdünnung hierhin überströmt. Hierauf wird wieder durch Hahnstellung die Verbindung von B mit der äußeren Luft hergestellt, durch Heben von A mittels des nach B zurücktretenden Quecksilbers die Luft nach außen ausgetrieben und dasselbe Spiel beliebig oft wiederholt. Die Vorzüge der Quecksilberluftpumpe gegenüber den Kolbenluftpumpen sind leicht einzusehen; sie hat keinen schädlichen Raum und keine zu dichtenden beweglichen Flächen, außer dem Hahne. Sie arbeitet deshalb viel vollkommener als die Kolbenluftpumpe, allerdings auch langsamer. Bei der allmählich fortschreitenden Luftverdünnung bilden sich aus dem Quecksilber Dämpfe, doch in sehr geringem Maße; dieselben haben bei 0° C. Temperatur nur eine Spannung entsprechend 0,001 mm Quecksilbersäule. Man wendet die Quecksilberluftpumpen hauptsächlich da an, wo es sich um möglichst weitgehende Luftverdünnung, also möglichste Annäherung an das vollkommene Vakuum in kleineren Räumen handelt. Mit den neuesten und besten Konstruktionen läßt sich eine Luftverdünnung von 0,005 Milliontel Atmosphäre oder 0,000004 mm Quecksilbersäule erreichen, d. i. also eine 200 Milliontel Verdünnung, während man mit den gewöhnlichen Kolbenluftpumpen nur 1200 Milliontel Atmosphäre oder 1 mm Quecksilbersäule und mit den vollkommensten Kolbenluftpumpen etwa 0,1 mm Quecksilbersäule erzielen kann.

Die oben schematisch dargestellte gewöhnliche Geißlersche Quecksilberluftpumpe, welche zuerst 1857 von dem bekannten Glastechniker Dr. H. Geißler in Bonn konstruiert wurde, ist verschiedentlich verändert und verbessert worden, sowohl behufs Erhöhung der Wirkung wie zur Beschleunigung derselben, sowie anderseits auch bezüglich der Handlichkeit und Sicherheit der Anwendung. Die Pumpe von Serravalle hat statt des einen beweglichen Glasgefäßes deren zwei, die in abwechselndem Spiele auf und ab gehen, wobei sich zwei Dreiwegehähne selbstthätig öffnen und schließen, derart, daß der Rezipient stets mit dem Vakuum in einem der beiden Gefäße in Verbindung ist, also kontinuierlich evakuiert wird. Eine besondere Eigentümlichkeit hat die Töplersche Quecksilberluftpumpe, indem bei derselben alle Hähne vermieden sind; die Öffnung und Schließung der Verbindungen geschieht mittels Quecksilberverschlüsse. Eine neuere Konstruktion von Quecksilberluftpumpen aus den letzten Jahren ist noch diejenige von E. Leybolds Nachfolger in Köln; bei derselben findet keine Auf- und Abbewegung des Gefäßes statt, welches in der praktischen Anwendung nicht nur die Arbeit verlangsamt, sondern auch lästig ist und allein die Thätigkeit einer Person in Anspruch nimmt. Das abwechselnde Auf- und Absteigen des Quecksilbers und damit das Ausblasen der Luft und die folgende Erzeugung des Vakuums wird auf folgende Weise selbstthätig bewirkt. Das eine der beiden mit Schlauch verbundenen Glasgefäße liegt auf der einen Seite eines leichten Wagebalkens, welcher durch ein Gegengewicht so ausbalanciert ist, daß das mit Quecksilber gefüllte Gefäß das Übergewicht hat, also niedersinkt, bei leerem Gefäße dagegen die andere Seite niedergeht. Das Quecksilbergefäß ist durch einen Schlauch mit der oberen Seite eines geschlossenen Gefäßes verbunden, welches unten an eine Druckwasserleitung angeschlossen ist; letztere hat einen Dreiwegehahn, durch welchen Wasser unter Druck in das Gefäß treten oder aus diesem abfließen kann, und der Hahn wieder ist mit dem Wagebalken verbunden, so daß er durch die Bewegung desselben in eine der beiden Stellungen gebracht wird. Ist das Quecksilbergefäß gefüllt, so steht der Hahn so, daß aus der Leitung von unten Wasser in das geschlossene Wassergefäß tritt. Hierdurch wird die Luft in demselben komprimiert, tritt nun durch den Verbindungsschlauch in das Quecksilbergefäß und drückt das Quecksilber aus demselben in das höher stehende Glasgefäß, aus welchem hierdurch, wie oben beschrieben, die Luft ausgetrieben wird. Wenn das Quecksilber aus dem unteren Gefäße ganz hinausgetrieben ist, steht es in dem oberen bis zum Hahn; dann schlägt der Wagebalken, wie oben dargelegt, um, wobei er den Wasserhahn so umstellt, daß der Zufluß zu dem Wassergefäß geschlossen, der freie Abfluß geöffnet wird. Das Wasser fließt also aus, die Luftpressung geht zurück und das Quecksilber sinkt durch seine Schwere wieder in das untere Quecksilbergefäß zurück, in dem oberen hierbei ein Vakuum erzeugend. Sobald das Quecksilber wieder das untere Gefäß ganz anfüllt, erhält dieses das Über-

gewicht, der Wagebalken schlägt herüber und bringt den Wasserleitungshahn in die erste Stellung, worauf sich das Spiel wiederholt.

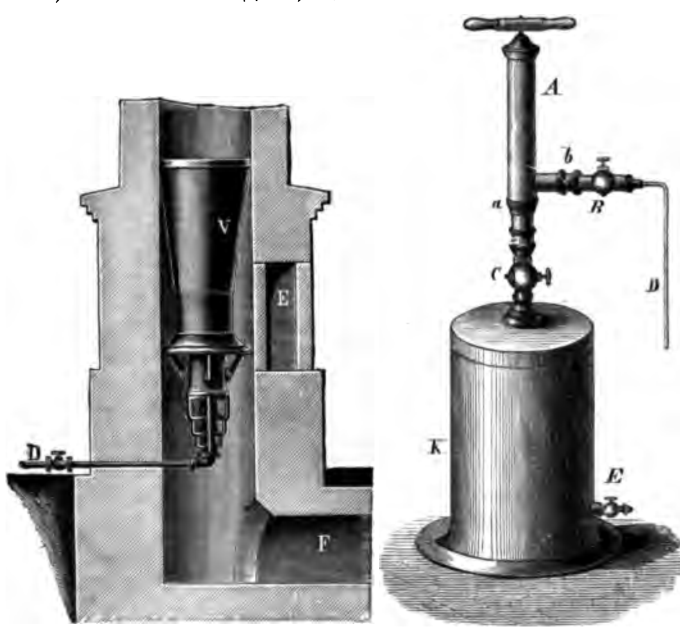
Weiteres über Quecksilberluftpumpen und ihre Anwendung insbesondere für die Entleerung der Birnen elektrischer Glühlampen findet sich in dem III. Bande dieses Werkes auf S. 163—167.

Versuche mit der Luftpumpe. Die Luftpumpe wird zu sehr vielen wissenschaftlichen Experimenten verwendet. Es wurde schon gesagt, daß durch dieselbe der Luftdruck nachgewiesen wurde: man kann den Rezipienten je nach seiner Größe und der Luftverdünnung nur durch mehr oder weniger große Kraft von seinem Teller abheben; hat man statt des glockenförmigen Rezipienten eine oben mit einer Blase zugebundene Röhre, so platzt diese Blase schließlich durch den äußeren Luftdruck. Daß Quecksilber durch eine Holzplatte hindurchdringt, wenn man letztere als Verschluß einer Vakuumröhre benutzt, ist schon bei früherer Gelegenheit gesagt worden. In einer Röhre, deren oberes Ende in den Rezipienten reicht, steigt Wasser oder Quecksilber in die Höhe; stellt man eine halb gefüllte Flasche mit Wasser unter den Rezipienten, durch deren dicht schließenden Stopfen ein Röhrchen ins Wasser reicht, welches oben zu einer feinen Öffnung ausgezogen ist, so springt beim Evakuieren (Luftleermachen) des Rezipienten das Wasser aus dem Röhrchen in die Höhe. Eine schlaff mit Luft gefüllte, geschlossene Blase schwillt im Vakuum des Rezipienten an und platzt schließlich infolge der Ausdehnung der in ihr befindlichen Luft, deren Druck oder Expansivkraft die verdünnte Luft im Rezipienten nicht mehr das Gleichgewicht halten kann. In dem Vakuum unter dem Rezipienten der Luftpumpe gibt es keine Schallwirkung, eine Glocke tönt beim Luftleerpumpen immer schwächer und gibt schließlich keinen Ton, denn die Luft ist es, welche den von einem Körper erzeugten Schall fortpflanzt und unserem Gehör übermittelt. Körper sind in dem Vakuum schwerer als in der Luft; genaue Wägungen werden deshalb, wie schon erwähnt, unter dem Rezipienten einer Luftpumpe ausgeführt. Durch Fallenlassen von Körpern im luftleeren Raume wurde der Widerstand der Luft gegen Bewegung und die gleiche Fallgeschwindigkeit für alle Körper festgestellt. Aus luft- oder gashaltigen Flüssigkeiten entweicht das Gas unter dem Rezipienten der Luftpumpe, da das Austreten bei dem Fehlen des äußeren Luftdruckes erleichtert ist: aus Wasser steigen Bläschen auf, und Bier, selbst wenn es schon etwas abgestanden, der natürliche Schaum verschwunden ist, fängt im Vakuum stark an zu schäumen; auch aus Holz, welches sich unter Wasser befindet, steigen Luftbläschen auf. Brennende Gegenstände erlöschen unter dem Rezipienten der Luftpumpe, und Tiere sterben sehr schnell, weil die sehr verdünnte Luft nicht mehr genug Sauerstoff enthält für die Verbrennung oder Atmung; Explosionskörper dagegen verbrennen auch im Vakuum, da sie selbst den zur Verbrennung erforderlichen Sauerstoff in sich vorrätig haben.

Anwendungen. Die Siedetemperatur von Flüssigkeiten hängt in hohem Grade von dem Drucke ab, unter dem die Flüssigkeiten sich befinden. Wasser siedet unter gewöhnlichem Luftdruck bei 100° C., im Dampfkessel dagegen z. B. bei einem Drucke von 5 Atmosphären erst bei 152° C.; umgekehrt liegt der Siedepunkt bei Luftverdünnung unter 100° C. Bei einem Vakuum von 92 mm Quecksilbersäule z. B. bei 50° und bei 17,4 mm Druck schon bei 20°, so daß in einem Glasgefäße, welches zum Teil mit Wasser gefüllt ist, dieses durch Anfassen mit der Hand zum Sieden gebracht werden kann, wenn die Luft über dem Wasser entsprechend weit verdünnt ist. In manchen Fällen ist es nun erwünscht, Flüssigkeiten oder Lösungen bei möglichst niedriger Temperatur, sowie schnell zu verdampfen. Dies ist z. B. bei der Rübenzuckerfabrikation der Fall: wenn die aus dem Rübensafte gewonnene Zuckerlösung bei der gewöhnlichen Siedetemperatur abgedampft wird, um den Zucker auskristallisieren zu lassen, so verwandelt sich viel Zucker, anstatt zu kristallisieren, in minderwertigen Sirup; man saugt deshalb mit Luftpumpen die sich aus der Lösung entwickelnden Dämpfe ständig und energisch ab, wodurch in den Abdampfgefäßen ein Vakuum erzeugt wird und die Verdampfung schneller und bei niedriger Temperatur erfolgt. Auch in Laboratorien und chemischen Fabriken ist es häufig wertvoll, Destillationen schnell und bei niedriger Temperatur zu bewirken; auch in solchen

Fällen wird mit einem Vakuum gearbeitet und zwar am bequemsten mit einem Dampfstrahl- oder Wasserstrahlluftsauger.

Auch als Schornstein-Ventilatoren zur Zugverstärkung schlecht ziehender Schornsteine werden dieselben angewandt, wenn z. B. ein Schornstein an Weite und Höhe nicht ausreicht, um genügenden natürlichen Zug zu geben, sowie besonders auch, wenn die abziehenden Rauchgase nicht direkt entweichen sollen, sondern ihre Wärme noch ausgenutzt werden soll, wie in Ringöfen, bei Regeneratoren, Ekonomisern bei Dampfkesseln: hierbei kühlen sich die Rauchgase so weit ab, daß die Temperatur im Schornstein zu gering ist für die Erzeugung eines genügenden Zuges. In solchen Fällen kann durch einen Dampfstrahlventilator auf einfache Weise und mit geringen Kosten der Zug nach Belieben vergrößert werden. Abb. 185 zeigt eine solche Einrichtung: der Ventilator V schließt am oberen Ende dicht in den Schornstein; unten ist die Dampfdüse, welche durch das Rohr D Betriebsdampf erhält, und F ist der Anschluß des Fuchses. Besonders für die niedrigen Schornsteine der Schiffsdampfkessel eignet sich diese Vorrichtung, durch welche mit wenig Dampfverbrauch eine gute Zugwirkung erlangt wird; auch ganz ohne Schornstein können Feuerungsanlagen betrieben werden, wenn nicht die Vorschrift besteht, daß die Rauchgase bis zu gewisser Höhe in die Luft geführt werden müssen — indem durch einen Dampfstrahlventilator allein der erforderliche Zug erzeugt werden kann.



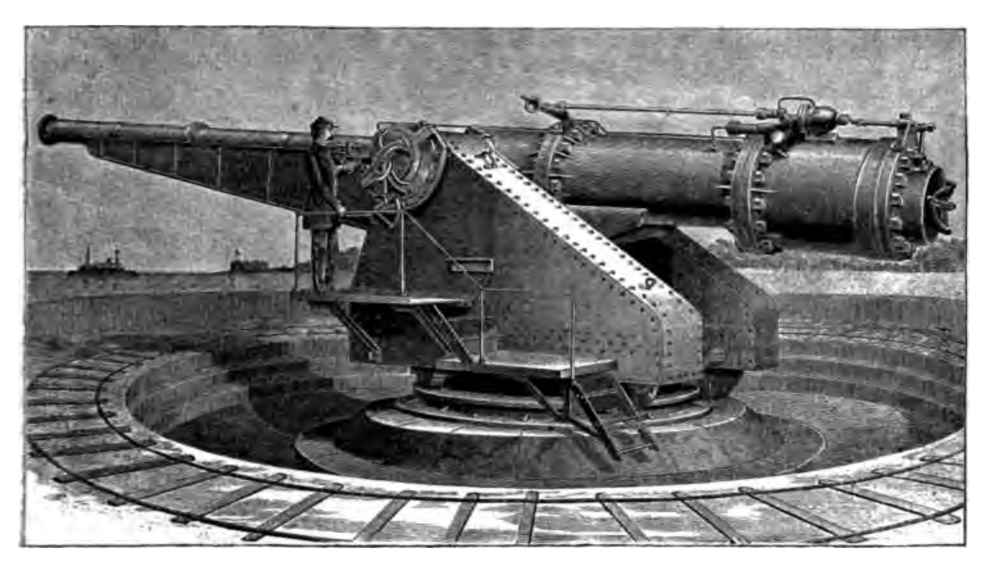
185. Körtings Schornsteinventilator. 186. Kleine Kompressionspumpe.

Kompressionspumpen. Sowohl die Stiefelluftpumpen, wie die Wasserkastenluftsauger und die Strahlluftsauger können statt zum Luftsaugen oder zur Luftverdünnung auch zur **Luftverdichtung** oder Kompression verwendet werden. Bei der Stiefelluftpumpe braucht man nur die Hahnstellungen umzukehren, um Luft in den Rezipienten einzupressen; bei Ventilluftpumpen ist eine Änderung in der Ventilanordnung erforderlich. Abb. 186 zeigt eine kleine Handluftkompressionspumpe, wie sie zu manchen Zwecken in der Praxis gebraucht wird. A ist der einfach wirkende Pumpenstiefel, welcher auf dem Kompressionsbehälter R sitzt. Durch den Ansatz b mit Hahn B wird direkt von außen oder durch ein Rohr D Luft angesaugt; bei b liegt ein Saugventil, bei a das Druckventil. Zwischen letzterem und dem Druckkessel ist noch der Absperrhahn c eingeschaltet, welcher ebenso wie B, bei der Kompression offen ist und dazu dient, den mit gepreßter Luft gefüllten Behälter dicht abzuschließen. Durch den Hahn E wird die gepreßte Luft bei der Verwendung entnommen z. B. für Lötzwecke.

Ähnliche Kompressionspumpen mit Behälter werden angewendet zur Prüfung der Dichtigkeit neuer Gasleitungen, sowie um verstopfte Gas- und Wasserleitungen in den Häusern zu reinigen, wenn die Verstopfungen nicht zu fest sitzen, z. B. bei Wasserleitungen von abgesetztem, losem Schlamm, bei Gasleitungen aus Rost von den eisernen Röhren oder Naphtalinablagerungen. In dem Kessel wird zuerst mit der Luftpumpe ein ziemlich hoher Druck erzeugt; mittels eines weiten Hahnes und eines Schlauches ist der Behälter

an die Leitung angeschlossen. Durch schnelles Öffnen des Hahnes bläst nun die Luft plötzlich und mit Heftigkeit in die Leitung und schleudert lose Gegenstände aus dem offenen Ende derselben hinaus.

Auch die bekannten Windbüchsen arbeiten mit komprimierter Luft. Dieselben haben einen hohlen Kolben aus starkem Eisenblech, in welchen durch eine Kompressionspumpe Luft eingepreßt wird; ein kleines, nach vorn gelegenes Druckventil verhindert das Austreten derselben. Durch einen Drücker wird beim Schuß dieses Ventil mit einem Stift für einen Augenblick geöffnet, und es tritt ein Quantum gepreßter Luft mit Heftigkeit durch einen Kanal in den Lauf, aus welchem sie das Geschoß hinaustreibt. Die Wirkung der Luftbüchsen kann diejenige der Feuergewehre bei weitem nicht erreichen, denn der Druck der gepreßten Luft in dem Kolben kann nicht gut über 25 Atmosphären getrieben werden; bei der plötzlichen Verbrennung von gewöhnlichem Pulver im geschlossenen Raum dagegen beträgt die Gasspannung über 1000 Atmosphären, und bei dem modernen Pulver für Feuerwaffen noch viel mehr. Wenn auch eine solche Spannung wohl nicht



187. Amerikanische Druckluftdynamitkanone.

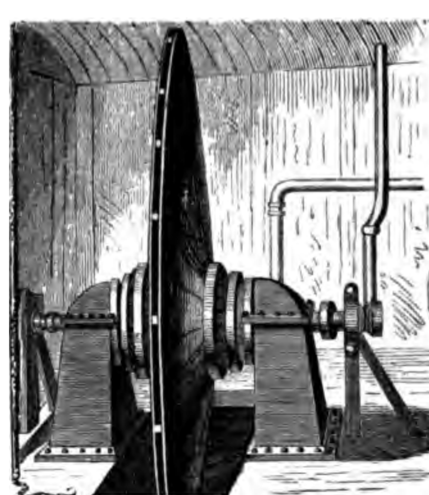
thatsächlich zur Wirkung kommt, da das Pulver nicht ganz momentan verbrennt und vom ersten Augenblick an schon die Kugel sich fortbewegt, so daß der Raum für die Explosionsgase vergrößert wird, so ist doch der Druck vielmal größer als bei Luftdruckgewehren. Als Kriegswaffe können letztere daher nicht in Betracht kommen; ihre im Vergleich zu Pulvergewehren geringe Leistung geht schon aus der viel geringeren Schußweite, der viel stärker gekrümmten Geschoßbahn und der geringen Treffsicherheit hervor.

In neuerer Zeit hat man doch wieder Versuche mit pneumatischen Geschützen gemacht, und zwar mit Kanonen für Dynamitgeschosse zur Küstenverteidigung. Gewöhnliche Geschütze können für solche gefährliche Sprengladungen nicht verwendet werden, da die Gefahr zu groß ist, daß letztere schon beim Abfeuern im Rohre explodieren und so statt dem Feinde der eignen Mannschaft Tod und Verderben bringen. Da aber mit dem fürchterlichen Sprengstoff Dynamit gefüllte Geschosse bei der Küstenverteidigung gegen Panzerschiffe sehr große Wirkung haben müssen, da ein einziges Geschoß mit einer größeren Ladung Dynamit das größte Kriegsschiff vernichten kann, so hat man schon seit mehr als 10 Jahren wiederholt versucht, Kanonen für Dynamitgeschosse mit Druckluft zu betreiben, besonders in den Vereinigten Staaten und später auch in England. Abb. 187 zeigt (nach Scientific American) ein Druckluftgeschütz, wie sie in den Küstenverteidigungswerken von New York, Boston und San Francisco aufgestellt sind. Die Kanone ist

15 m lang und aus einzelnen gußeisernen Röhren mit Flanschen dicht zusammengesetzt. Die Seelenweite (lichter Durchmesser) ist 38 cm. Das Geschütz kann durch einen Mechanismus um eine horizontale Achse gedreht, also in verschiedene Steigungen gebracht und horizontal im Kreise gedreht werden. Die komprimierte Luft wird von Vorratskesseln aus durch eine Rohrleitung von unten her in die am hinteren Ende befindliche Luftkammer geführt. Die Kompressionspumpen verdichten die Luft in den Behältern auf 140 Atmosphären (2 Pfund Druck pro Quadratzoll englisch); beim Abschießen tritt die Druckluft aus der Kammer durch zwei Kanäle in den Lauf hinter das Geschoß und treibt dieses mit einem Druck von etwa 70 Atmosphären hinaus. Um bei diesem verhältnismäßig geringen Druck doch eine genügende Wirkung zu erzielen, hat das Geschütz eine so bedeutende Länge; der Druck wirkt also auf das Geschoß längere Zeit als bei Pulvergeschützen. Die Geschosse haben die Form einer sehr langen Granate und verschiedene Größe; alle haben aber, um aus demselben Geschütz verschossen werden zu können, gleichen Kopf und Führungsteil, der genau in das Rohr paßt, und auf den die Druckluft wirkt. Das größte Geschoß hat die Länge von 3,35 m, es gleicht also einem Torpedo; das Gewicht beträgt 450 kg, die Sprengladung bei diesen wiegt 225 kg. Ebenso wie bei den Windbüchsen hat die Flugbahn eine stark gekrümmte Form; man schießt deshalb mit sehr hoher Elevation. Bei einem Winkel von 35° beträgt die Schußweite mit dem größten Geschoß 2 200 m; bei dem kleinsten von 15 cm Durchmesser und 108 kg Gewicht mit 23 kg Sprengladung etwa 5 500 m.



188. Körtings Wasserstrahl-Luftdruckapparat.


189. Zentrifugalluftpumpe.

Die Ansicht über die Zukunft der Druckluftgeschütze für Sprenggeschosse ist geteilt; bis jetzt sind keine andern Staaten dem Beispiel Nordamerikas und Englands gefolgt, und es scheint, daß die Vorteile derselben durch schwere Nachteile aufgehoben werden, nämlich zu geringe Treffsicherheit, welche durch die zu geringe Kraft beim Abschießen bedingt ist. Das Geschoß muß sich wegen der leichten Explodierbarkeit der Sprengfüllung im Rohre mit möglichst wenig Widerstand bewegen; aus diesem Grunde kann man keine gezogenen Geschütze verwenden, und bei glatten Läufen und der verhältnismäßig geringen Anfangsgeschwindigkeit ist die Flugbahn zu unsicher.

Mit den Druckluft- und Dampfstrahlgebläsen läßt sich ebenfalls Luft verdichten, doch nicht auf hohen Druck, dagegen lassen sich große Luftmengen mit geringerem Druck forttransportieren. Dampfstrahlunterwindgebläse werden bei Dampfkesseln und sonstigen Feuerungsanlagen verwendet, um die Luft energischer durch den Rost in den Verbrauchsraum zu drücken und eine lebhaftere Verbrennung und damit eine höhere Heizwirkung zu erzielen. Einen kleinen handlichen Wasserstrahl-Luftdruckapparat für Lötzwecke stellt Abb. 188 dar. G ist der Behälter für die gepreßte Luft, L der Wasserstrahlapparat mit Druckwasserrohr E; ein auf den Behälter gesetztes Federmanometer zeigt den Druck an, und bei A kann man die gepreßte Luft ausströmen lassen. Der Behälter ist stets zum Teil mit Wasser gefüllt, und der Wasserstand ist an dem Glasrohre W zu sehen; bei U fließt das Wasser ab. Solche Druckluftstrahlapparate werden auch benutzt,

um Luft in Wasser einzudrücken, z. B. für Fischbehälter, oder um Gase in Flüssigkeiten zu pressen, in denen sie absorbiert werden sollen.

Ähnlich wie die Zentrifugalpumpen zum Fördern von Wasser werden Zentrifugalluftpumpen zum Saugen und Drücken von Luft verwendet. Dieselben sind sehr einfach; sie bestehen, wie Abb. 189 zeigt, aus zwei großen kreisrunden, dünnen, schwachgekrümmten Blechscheiben, welche auf einer Welle sitzen derart, daß sie einander ihre konvexen Seiten zukehren, so daß am äußern Rande zwischen beiden Scheiben ein schmaler Ring frei bleibt. Die Welle ist hohl und steht einerseits mit der Rohrleitung in Verbindung, aus welcher Luft abgesaugt werden soll, und anderseits durch Öffnungen mit dem Raum zwischen den Scheiben; durch sehr schnelle Rotation des Rades wird nun die in diesem Zwischenraum befindliche Luft nach außen aus dem äußeren Schlitz hinausgeschleudert, und dementsprechend aus der hohlen Welle Luft angesaugt. Wenn man das Rad mit einem Gehäuse umgibt, so wird in diesem die Luft verdichtet.

Wenn die natürliche Ventilation für die Lufterneuerung in geschlossenen Räumen nicht ausreicht, dann kann auf künstlichem Wege dem Mangel auf zwei Arten abgeholfen werden; man kann Luft aus dem Raume absaugen, so daß von außen frische Luft nachströmt, oder umgekehrt, frische Luft einblasen und so die alte Luft aus besonderen Öffnungen oder den Undichtigkeiten der Fenster, Thüren und Mauern hinausdrängen. Beide Methoden werden in der Ventilationstechnik angewendet; im ersteren Falle kommen Luftsauger, im zweiten Luftdruckapparate zur Verwendung. In beiden Fällen handelt es sich nur um Erzeugung ganz geringer Unterschiede zwischen dem äußeren und dem inneren Luftdruck, dagegen müssen meist große Luftmengen gefördert werden. Außer für Wohnräume, Schulen, Säle, Fabrikräume, ist eine starke Ventilation z. B. für Trockenräume erforderlich, da möglichst viel frische, trockene Luft mit den zu trocknenden Gegenständen in Berührung gebracht werden soll, um diesen die Feuchtigkeit zu entziehen. Für solche Ventilationszwecke eignen sich Kolbenluftpumpen und auch die gewöhnlichen Wasserkastengebläse nicht, da diese zwar größere Luftleeren oder Luftpressungen erzeugen, aber keine sehr großen Luftmengen ansaugen oder drücken können. Die gewöhnlichen Ventilatoren für solche Zwecke bestehen aus einem Rade mit einer Anzahl auf der Achse sitzenden Flügeln, welche ähnlich wie Windmühlenflügel, schräg zur Ebene des Rades stehen (s. Abb. 190). Ihre Wirkung ist die umgekehrte wie bei Windmühlen: bei diesen bringt die bewegte Luft, der Wind, das Rad zur Drehung; bei den Ventilatoren wird durch die Drehung des Rades die Luft in Bewegung gebracht, also Wind erzeugt, welcher senkrecht zur Ebene des Rades sich bewegt, und je schneller die Rotation, desto größer ist die bewegte Luftmenge. Der Kraftverbrauch ist für nicht ganz große Ventilatoren gering. Zum Betriebe eignen sich sehr gut kleine Elektromotoren; ein mit solchem direkt auf der Welle sitzenden Motor betriebener Ventilator ist in Abb. 190 dargestellt.



190. Ventilator mit Elektromotor.

Man kann kleinere Ventilatoren für Wohnräume bei dem sehr geringen Kraftbedarf auch durch Uhrwerke mit Gewichten betreiben, oder wo Druckwasser vorhanden ist, durch einen dünnen Wasserstrahl, welcher kontinuierlich gegen die Flügel spritzt und das sehr leicht bewegliche Rad in Rotation setzt.

Statt dieser rotierenden Flügelventilatoren werden auch vielfach Strahlapparate zur Ventilation benutzt. Bei Verwendung von Dampf oder Preßluft als Betriebsmittel sind dieselben ähnlich, wie der schon beschriebene und abgebildete Schornsteinventilator. Besonders für stärkere Ventilationswirkungen in solchen Räumen eignen sie sich, wo keine Kraft zum Betriebe größerer Flügelventilatoren zur Verfügung steht und schlecht zu

beschaffen ist. In der Abb. 191 ist die Anwendung eines **Luftstrahlventilators** dargestellt, um frische Luft in einen Bergwerksstollen vor Ort (der Arbeitsstelle) zu blasen. Bei den meisten größeren Tunnelbauten, sowie auch vielfach in Bergwerken ist Druckluft zum Betriebe der Gesteinsbohrmaschinen vorhanden; man braucht also nur von der Preßluftleitung eine kleine Abzweigung nach dem Strahlventilator herzustellen. Anstatt die Preßluft direkt durch die Lutten (Ventilationsleitungen) vor Ort strömen zu lassen, wird in die Luttenleitung der Ventilator eingesetzt; hierdurch wird eine bedeutend größere Luftmenge gefördert, indem die Preßluft eine große Menge Luft von außen mitreißt. In der Abb. 191 ist V der Strahlventilator mit dem Regulierventil S, d die Preßluftzuleitung mit Absperrventil D. Wird der Ventilator umgekehrt eingesetzt, so saugt er die Luft von der Arbeitsstelle ab.

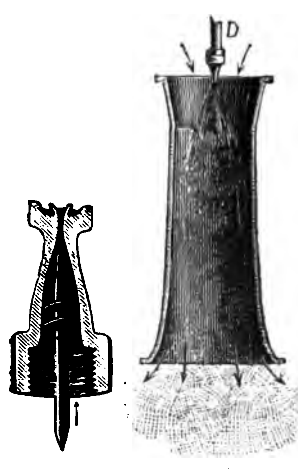
Die gewöhnlichen Wasserstrahlpumpen eignen sich nicht zur Ventilation, weil der dünne geschlossene Strahl des Druckwassers keine größere Luftmenge mitreißen kann. Dieser Zweck wird dagegen von der **Körtingschen Streudüse** (Abb. 192) erfüllt. Dieselbe wird auf die Druckwasserleitung geschraubt; das ausströmende Wasser ist gezwungen, einem im Innern dieser Düse angebrachten Schraubengang, der sich dicht an die Innenwand anschließt, zu folgen, und wird hierbei in Rotation versetzt. Die Drehung behält das Wasser beim Austritt aus dem konischen Mundstück bei, und es bildet sich durch die Zentrifugalkraft und die geradeaus gerichtete Ausströmungsgeschwindigkeit zusammen



191. Kortings Luftstrahlventilator zur Lüftung in Bergwerken.

ein breiter Kegel aus feinem Wasserstaub, der größere Luftmengen mit sich fortreißt (s. Abb. 193); D ist die Streudüse. Solche Streudüsen werden auch zum Einblasen von Petroleum oder Naphtha in Feuerungen verwendet.

Eine sehr wichtige Anwendung haben die Luftsauge- und Kompressionspumpen für die **pneumatische Brief- und Paketbeförderung**, die sogenannte Rohrpost, gefunden. Schon vor 200 Jahren machte Papin (dessen Verdienste um die Erfindung der Dampfmaschine weiterhin noch besprochen werden) auf die Idee aufmerksam, Wagen durch Luftdruck von hinten durch Tunnelröhren zu blasen, aber es wurde nicht versucht, diese Idee zur Ausführung zu bringen. Erst in neuester Zeit ist die Idee wieder aufgenommen oder von neuem erfunden und in die Wirklichkeit übertragen worden. Die Erfindung wird dem Franzosen **Ador** zugeschrieben, der 1852 im Park Monceau mit Erfolg Versuche anstellte, durch komprimierte Luft kleine Pakete in Röhren zu befördern. Vorher war jedoch auf der ersten Weltausstellung zu London 1851 eine Rohrposteinrichtung im kleinen Maßstabe zu sehen gewesen. Einige Jahre später nahm der englische Physiker Latimer Clark ein englisches Patent auf ein System pneumatischer Depeschenbeförderung, und im Jahre 1860 wurde in London eine ausgedehnte Anlage für die städtische Briefbeförderung angelegt. In Paris wurde 1867 eine große Rohrpostanlage für den inneren Dienst der Post und Telegraphie geschaffen, die später sehr vervollkommnet und ausgedehnt wurde.



192. Streudüse. 193. Streudüse zur Ventilation.

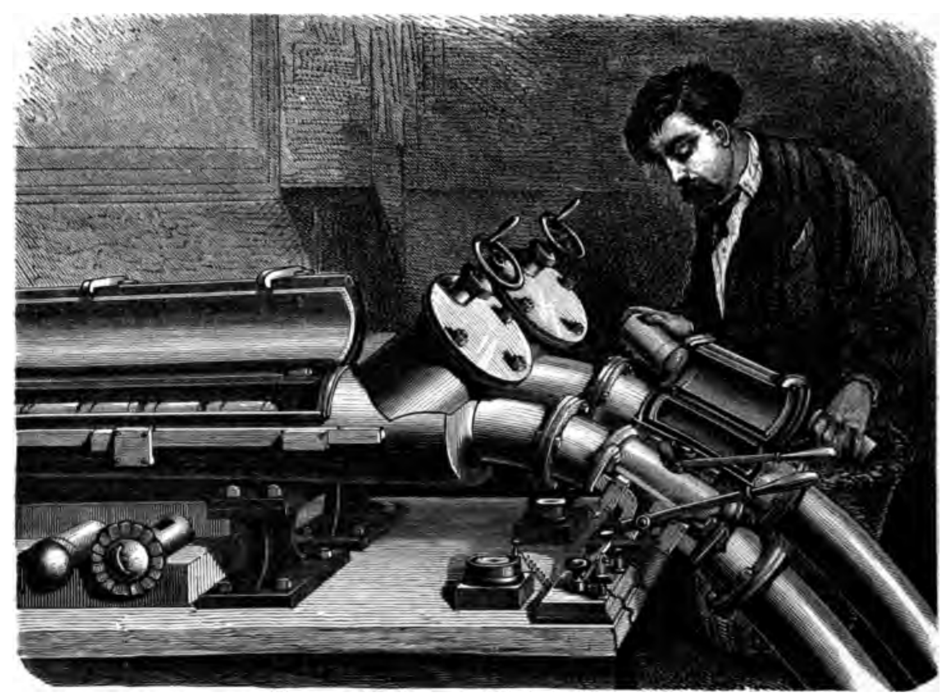
In Deutschland wurde 1865 von Siemens & Halske in Berlin ein dem englischen ähnliches System der pneumatischen Briefbeförderung ausgebildet. In Europa befinden sich jetzt größere Rohrpostanlagen hauptsächlich in London, Manchester, Birmingham, Liverpool, Wien, Paris und Lyon, in Deutschland nur in Berlin. Letztere wurde 1876 eingerichtet und seitdem sehr erweitert. Die Anlage ist nach dem Radialsystem eingerichtet: um eine mittlere Hauptstation liegen eine Anzahl Einzelstationen in den verschiedenen Stadtteilen, welche mit der ersteren durch unterirdische Rohrleitungen verbunden sind. Es wird sowohl mit komprimierter wie mit verdünnter Luft gearbeitet; nur in der Zentralstation und den Hauptstationen befinden sich die Luftkompressions- und Vakuumpumpen, sowie Behälter für komprimierte und verdünnte Luft. Die Wirkungsweise ist kurz folgende. Die Rohrleitungen der Einzelstationen münden an beiden Enden, also den Nebenstationen einerseits und den Hauptstationen oder der Zentralstation anderseits in einen Kasten, der mit einem dichtschließenden Deckel versehen ist. In den Hauptstationen mündet in diese Kammern je ein Rohr von den Druckluft- und den Vakuumbehältern, und durch Hahnstellung kann eine dieser beiden Röhren nach dem Kasten geöffnet werden. Soll nun z. B. von der Zentralstation eine Sendung abgeschickt werden, so werden die Briefe in lederne Briefbehälter gelegt, die mit geringem Zwischenraum, doch ohne Reibung, in die Leitungsröhren hineinpassen. Diese Behälter werden in den Kasten gesteckt und gelangen aus diesem in die Mündung der Leitung; dann wird der Kasten geschlossen und der Drucklufthahn geöffnet. Die gepreßte Luft treibt jetzt die Briefbehälter durch die Rohrleitung vorwärts; gleichzeitig wird der Endstation oder Zwischenstation der Abgang telegraphisch mitgeteilt, worauf der Beamte daselbst einen Hahn öffnet, aus dem die Luft in der Leitung vor den Briefbehältern entweichen kann. Letztere fallen in den Kasten, und der Beamte nimmt sie heraus, nachdem er zuvor einen Durchgangshahn in der Leitung geschlossen hat, damit nicht unnütz mehr Druckluft ausströmt. Ist die Station keine End- sondern eine Zwischenstation, so nimmt der Beamte nur die für diese Station bestimmten Briefbehälter heraus, öffnet wieder den Durchgangshahn, worauf die komprimierte Luft den Lederkasten weitertreibt; der Drucklufthahn auf der Hauptstation bleibt während dieser Zeit offen, da nur von hier aus die Betriebsdruckluft nachgedrückt wird. Soll nun umgekehrt eine Sendung von einer Nebenstation zur Zentralstation geschickt werden, so wird nach telegraphischer Verständigung auf letzterer der Vakuumhahn geöffnet und so in der Leitung eine Luftverdünnung erzeugt. Durch den geöffneten Hahn in der Endstation drückt die atmosphärische Luft den Briefbehälter nach der Zentrale. Der Betrieb ist so eingerichtet, daß in ganz regelmäßigen Zwischenräumen die Briefbehälter durch das Rohrsystem verkehren; auf eine Entfernung von 1000 m dauert die Beförderung einer Sendung einschließlich des Einlegens und Herausnehmens des Behälters auf den Stationen 2 1/2 Minuten. Die Rohrleitungen haben 65 mm lichten Durchmesser; es werden immer eine Anzahl Büchsen zugleich befördert, jede enthält 20 Briefe oder Postkarten.

Abb. 194 zeigt eine Station der pneumatischen Depeschenbeförderung in Paris mit zwei nebeneinander liegenden Rohrleitungen.

Pneumatische Eisenbahnen. Schon vor etwa 60 Jahren trat der Engländer Medhurst mit dem Plane auf, eine Eisenbahn für Güter- und Personenbeförderung mit Druckluft zu betreiben; er arbeitete ein vollständiges Projekt einer solchen Bahn aus, aber noch war die Angst vor der Dampfeisenbahn nicht ganz geschwunden, und dieser neue Plan erschien zu abenteuerlich, um zunächst Aussicht auf Verwirklichung zu haben. Die Idee war folgende. Zwischen den Schienen einer gewöhnlichen Eisenbahn sollte eine Rohrleitung liegen, in welcher ein annähernd dicht schließender, aber doch leicht beweglicher Kolben durch Druckluft fortgedrückt werden sollte. Der Kolben sollte mit einem gewöhnlichen Eisenbahnwagen durch einen breiten Eisenstab verbunden werden; zu diesem Zweck mußte die Druckluftröhre in ihrer ganzen Länge oben einen schmalen Schlitz erhalten, durch welchen bei der Fortbewegung dieses Verbindungsstück durchlaufen konnte. Hier lag die größte Schwierigkeit, mit welcher sich auch später die Techniker hauptsächlich beschäftigt haben: das Verbindungsstück sollte ohne erheblichen Widerstand durch den Schlitz gleiten, und doch mußte durch eine Verschlußvorrichtung die Öffnung in der ganzen Rohr-

leitung gegen das Entweichen der Druckluft geschlossen bleiben. Im Jahre 1840 wurde eine $3^1/_2$ km lange pneumatische Eisenbahn auf der West-London-Eisenbahn gebaut; mehrere andere Strecken folgten, aber alle mußten bald wieder aufgegeben werden, nachdem große Geldsummen dabei verloren gegangen waren, da das ganze System sich als verfehlt erwies. Auch in Frankreich war alsbald eine $2^1/_2$ km lange atmosphärische Eisenbahn auf der Strecke zwischen Nanterre und St. Germain ausgeführt worden; aber auch hier wurde die Sache bald wieder ganz aufgegeben, da der finanzielle Erfolg zu entmutigend war.

Später hat man atmosphärische Eisenbahnen auf anderer Grundlage entworfen; der ganze Eisenbahnwagen oder Zug soll ebenso wie die Briefbehälter bei der Rohrpost durch eine Tunnelröhre befördert werden. Zu diesem Zweck erhält der Wagen an einem Ende eine runde Scheibe, welche mit einem elastischen Dichtungsmittel, z. B. einem recht dichten Borstenring besetzt ist, welcher genau in den Lichtraum der glatten Tunnelröhre



194. Station der pneumatischen Depeschenbeförderung in Paris.

hineinpaßt. Bei der großen Querschnittfläche dieser Scheibe ist nur ein geringer einseitiger Überdruck, also entweder durch Luftkompression von hinten, oder Luftabsaugung von vorn, wodurch die atmosphärische Luft von hinten Überdruck erhält, erforderlich, um eine bedeutende Zugkraft zu erzielen. Es scheint aber zunächst keine Aussicht vorhanden zu sein, daß der pneumatische Betrieb für Eisenbahnen in dieser Art in größerem Maßstabe eingeführt wird; für unterirdische Strecken, wie in langen Tunneln, oder den Untergrundbahnen großer Städte, bei welchen die Verwendung der gewöhnlichen Lokomotiven wegen der Rauchentwickelung große Unzuträglichkeiten haben, kommen eher die elektrischen Bahnen in Betracht, die bereits so vervollkommnet sind, daß sie mit größerer Geschwindigkeit und Sicherheit fahren als Dampflokomotiven.

In neuester Zeit ist ein auf wesentlich verschiedener Grundlage beruhendes Druckluft-Straßenbahnsystem in den Vordergrund getreten. Der neue Gedanke, auf dem dieses System beruht und der es von den älteren pneumatischen Bahnen im Prinzip unterscheidet, ist die Mitnahme eines Quantums gepreßter Luft auf dem Fahrzeug selbst. In

einer mit Maschinenkraft ausgerüsteten Station oder Zentrale wird durch Luftpreßpumpen Luft auf hohe Spannung komprimiert: bei dem System von Hughes & Lancaster in Chester (England) auf 12 Atmosphären, bei dem System von Mekarski in Paris dagegen auf 50 und selbst bis 80 Atmosphären. Diese Druckluft wird in eine Anzahl in oder unter dem Wagen befindliche Behälter oder Rezipienten gefüllt und dient dann zum Betrieb eines Druckluftmotors, der ähnlich wie eine Dampfmaschine konstruiert ist, indem die gepreßte Luft auf Kolben in Cylindern wirkt und mittels Pleuelstangen und Kurbeln die Triebachsen umtreibt. Eine erfolgreiche Anwendung hat die Druckluft-Straßenbahn System Mekarski in Bern gefunden, nachdem das System schon früher (1883) zuerst in Nantes praktisch erprobt worden war. Die 1890 errichtete Druckluft-Tramwaybahn zu Bern arbeitet mit 32 Atmosphären Betriebsdruck; der Betrieb der Luftkompressionsstation geschieht durch eine Wasserkraft. Jeder Wagen hat in ähnlicher Anordnung, wie die Lokomotiven, an jeder Seite einen Druckluftmotor; der Preßluftvorrat befindet sich in 10—12 Rezipienten und reicht für eine Fahrt von 20 km mit der gewöhnlichen Geschwindigkeit von 12 km stündlich für Beförderung von 20 Personen, die der Wagen faßt, aus. Die Geschwindigkeit kann bis 15 km stündlich vergrößert werden.

Der Druckluftbetrieb besitzt für Straßenbahnen manche Vorzüge, indem die Wagen kein Geräusch machen, die Maschinen keinen Dampf, Rauch und Ruß verursachen und leicht bezüglich der Geschwindigkeit zu regulieren sind; jedoch sind die Wagen sehr schwer, so daß auf jede beförderte Person verhältnismäßig zu viel Totgewicht, also nutzlos aufgewendete Kraft, kommt, und die Anlage- und Betriebskosten sind hoch, wodurch die technischen Vorzüge wieder aufgehoben werden, so daß die Druckluft-Straßenbahnen nur unter besonderen günstigen Umständen mit den Pferde- oder elektrischen Straßenbahnen werden konkurrieren können.

Eine große Bedeutung hat in neuerer Zeit die Druckluft noch für die **Kraftübertragung** und zentrale Kraftversorgung bekommen. Diese wird zum Schlusse des III. Teiles dieses Bandes kurz besprochen wrden.

Luftschiffahrt und Flugmaschinen.

Das Luftschiff im Vergleich zum Segelschiff und Dampfer. Verschiedene Möglichkeiten des Luftfluges. Gebrüder Montgolfier. Charles und Gebrüder Robert. Die ersten Luftballonaufstiege. Blanchards und Jefferys Ballonfahrt über den Kanal. Roziers Tod. Der Fallschirm. Lenormand, Garnerin, Cocking, Robertson, Letur, Leroux. Gefahren der Luftschiffahrt. Sauerstoffmangel. Verunglückte Auffahrt von Tissandier, Sivel und Crocé-Spinelli. Gay-Lussacs und Biots Aufstiege. Greens, Coxwells und Glaishers Auffahrten. Luftreise des Géant. Militär-Luftschiffahrt. Fahrten des deutschen Vereins zur Förderung der Luftschiffahrt. Registrierballons. Lenkbare Ballons. Petins Luftschiff. Luftschiffe von Giffard, Dupuy de Lôme, Tissandier, Renard und Krebs. Campbell. Schwarz' Aluminiumluftschiff. Flugtechnik. Alte Flugmaschinen. Der Vogelflug. Neuere Flugmaschinen; Bechtel, Trouvé, Hargrave, Maxim, Wellner, Langley. Lilienthals Flugversuche.

Der Wunsch der Menschen, wie die Vögel durch die Lüfte zu ziehen, hat wohl schon seit den ältesten Zeiten bestanden. Im Wasser zu schwimmen hat der Mensch schon sehr früh gelernt, obwohl er von der Natur nicht mit den hierzu geeigneten Organen ausgerüstet ist. Schon die ältesten küstenbewohnenden, handeltreibenden Kulturvölker haben es verstanden, Fahrzeuge zum Befahren des Wassers zu bauen; aber sich frei in die Luft zu erheben und zu fliegen oder wirklich brauchbare Flugapparate herzustellen, mit welchen der Luftozean nach Belieben durchschifft werden kann, ist bis heute allen Bemühungen, auch unserer vorgeschrittenen Technik, nicht gelungen. Das älteste Vorbild der Menschen war naturgemäß der Vogelflug. Wir sehen hoch über unserem Haupte einen Habicht ruhig und majestätisch, sichtlich ohne große Anstrengungen, fast ohne Flügelschläge seine Kreise ziehen; wir wissen, daß der Vogel schwerer ist als die Luft, daß er also nicht „von selbst“ schwebt, sondern nur auf Grund bestimmter mechanischer, dynamischer Gesetze sich in die Luft erheben und sich in dieser bewegen kann, ja die Wissen-

schaft hat in neuerer Zeit den Vogelflug ziemlich genau untersucht und das alte Rätsel gelöst, wie den Vögeln das Fliegen möglich ist, und doch hat noch kein Mensch es nachzuahmen vermocht. Sollte der Mensch mit seiner Intelligenz und Beharrlichkeit, mit der er in so vielen Fällen das scheinbar Unmögliche möglich, die Naturkräfte sich dienstbar gemacht, die Natur besiegt hat, nicht doch noch mit den großartigen Hilfsmitteln der modernen Technik auch dieses Problem lösen, auch das noch fertig bringen, was der Vogel mit seinen einfachen Hilfsmitteln vermag? Wir werden sehen, daß heute die Aussichten keineswegs mehr so entmutigend sind, wie noch vor kurzer Zeit, daß die Anfänge zur Erreichung dieses Zieles gemacht sind, daß wir die Idee, in absehbarer Zeit fliegen zu können, nicht mehr in den Bereich des phantastischen Gedankenfluges ohne reale Unterlage zu verweisen brauchen. Zu Anfang unseres Jahrhunderts hätte man jeden für einen Narren erklärt, der es für möglich gehalten hätte, in einem Tage in höchst bequemer Weise von Berlin nach Paris zu gelangen, oder in sieben Tagen über den Atlantischen Ozean nach Amerika zu fahren, oder in wenigen Stunden eine Nachricht nach dem entgegengesetzten Punkte der Erde, nach Australien oder Japan zu übermitteln. Wer hätte nicht noch vor zwei Jahren darüber gelacht, wenn man ihm gesagt hätte, man könnte den Inhalt einer festen Holzkiste sichtbar machen, ohne sie zu öffnen? Und doch ist auch dies in letzter Zeit durch die Entdeckung von Professor Röntgen gelungen. Wo liegt die Grenze des der menschlichen Intelligenz Erreichbaren? In der That, wenn wir die Errungenschaften der Menschheit betrachten, können wir uns nicht vermessen, diese Grenze zu bestimmen. Mit jeder neuen Errungenschaft, jedem neuen glänzenden Siege unserer Intelligenz wird sich ein neues verlockendes Ziel zeigen, an dessen Erreichung wir unsere Kräfte setzen werden. Das ist eine Notwendigkeit, die Vorbedingung für unsere Kulturentwickelung; wir können und dürfen nie stillstehen, denn Stillstand ist Rückgang.

Doch kehren wir nach dieser Abschweifung zu dem Flugproblem zurück. Die älteste Nachricht über den Flug des Menschen haben wir in der griechischen Sage. Am Hofe des Minos, Königs von Kreta, des Vaters der Ariadne, lebte der Künstler Dädalus aus Athen, welchem viele wichtige Erfindungen, z. B. die des Hebels, des Bohrers, des Senkbleies und des Winkelmaßes, zugeschrieben werden, mit seinem Sohne Ikarus. Dädalus war in Kreta als Flüchtling aufgenommen worden, nachdem er in seiner Vaterstadt Athen zum Tode verurteilt worden war, weil er einen seiner Schüler, der seinen Meister an Wissen zu überflügeln drohte, aus Eifersucht von einem Felsen gestürzt hatte. In Minos' Auftrage baute er auf Kreta für das Ungeheuer Minotaurus das Labyrinth, in das er selbst später mit seinem Sohne von dem Herrscher eingesperrt wurde. Alle Fluchtgelegenheit zu Wasser und zu Lande war ihm abgeschnitten, es blieb nur die Luft, und er beschloß, durch die Luft zu entfliehen. Er bildete für sich und seinen Sohn künstliche Flügel aus Vogelfedern, die er mit Wachs zusammenklebte, und nachdem er seinen Sohn belehrt hatte, erhob er sich mit ihm in die Lüfte, um über das Meer zu entfliehen. Ikarus stieg, der Warnungen seines Vaters nicht achtend, von diesem neuen Fliegesport begeistert, zu hoch in die Lüfte; er kam dabei der Sonne zu nahe, so daß das Wachs seiner Flügel schmolz, er ins Meer hinabstürzte und elend ertrinken mußte. Dädalus aber entkam glücklich nach Sizilien.

Die ersten praktischen Versuche, in die Lüfte zu steigen, sind noch nicht so alt; vor etwas mehr als hundert Jahren erfanden die Brüder Montgolfier den Luftballon und fand der erste Aufstieg eines solchen mit Menschen statt. Damals schien das Problem der Luftschiffahrt bereits gelöst, es erschien nur noch als eine Frage der nächsten Zeit, daß man, wie zu Lande und zu Wasser, auch durch die Luft reisen könnte; aber in den folgenden hundert Jahren sind zwar manche Verbesserungen an dem Luftballon gemacht worden, doch ein lenkbares Luftschiff ist nicht erfunden worden.

Man sollte glauben, daß die Schwierigkeiten, ein solches zu konstruieren, nicht so groß sein könnten, nachdem einmal das Erheben in die Luft durch den Ballon ermöglicht ist. Die Luft bietet, wie wir früher gesehen haben, einen Widerstand, ebenso wie das Wasser, nur einen geringeren; es drängt sich also von selbst die Idee auf, daß ein Luftballon

ebenso durch mechanische Kraft bewegt werden könne, wie ein Schiff. Und vielfach wird auch der Luftballon mit einem Seeschiff verglichen; ebenso wie ein Schiff durch Wind und Segel und Steuer in beliebiger Richtung, auch gegen den Wind lavierend fahren kann, müßte man auch das Luftschiff nach Belieben dirigieren können. Aber es besteht zwischen beiden ein großer Unterschied, in welchem die Schwierigkeit des Problems des lenkbaren Luftballons zum Teil begründet ist; das Schiff schwimmt auf dem Wasser, zum Teil im Wasser, zum Teil in der Luft, der Ballon aber schwebt ganz in demselben Medium, der Luft. Das vom Winde mittels der Segel fortgetriebene Schiff findet im Wasser einen Stützpunkt für das Steuer; das Segelschiff ist dadurch steuerbar, daß es der in bestimmter Richtung wirkenden Windkraft durch das Steuer den nach rechts oder links seitlich wirkenden Widerstand des Wassers entgegensetzen kann. Bei Windstille ist ein Segelschiff in Wasserströmungen steuer- und manövrierunfähig; es muß dem Strome folgen, gleichviel, wie das Steuer gestellt wird. Der in der Luft schwebende Ballon hat keinen Stützpunkt, der dem Steuer einen Widerstand böte, durch welchen die Bewegungsrichtung gegen die Windrichtung abgelenkt werden könnte; die Luft bewegt sich am Steuer ebenso schnell, wie beim Ballon, und das ganze Luftschiff schwimmt, in sich selbst unbeweglich, im Luftozean, wenn ihm nicht durch eigene Kraft ein Antrieb gegeben wird, wie dem Dampfschiff durch die Schaufelräder oder Schraube. Hier liegt also die theoretische Möglichkeit, einen Ballon zu steuern und ihm eine Eigenbewegung gegen die umgebende Luft zu geben. Der Dampfer bewegt sich durch den Widerstand, den die Schaufeln des Rades oder die Flächen des Propellers im Wasser finden. Ebenso finden bewegte Flächen an der Luft einen Widerstand, und es kann eine nach vorn wirkende Kraft durch eine Schraube gewonnen werden. Aber auch hier macht für den bisherigen Stand der Technik ein Umstand die praktische Ausführung des durch maschinelle Kraft sich fortbewegenden und steuerbaren Ballons unmöglich. Die Größe des Auftriebes, also der Tragkraft, steht in einem bestimmten und zu ungünstigen Verhältnis zu dem Volumen des Ballons. Wie wir schon früher gesehen haben, ist der Auftrieb direkt vom Volumen abhängig; von der Größe des Auftriebes hängt aber wieder die Größe und Kraftleistung des mit in die Höhe zu nehmenden Motors zum Betriebe des Bewegungsmechanismus ab. Bis jetzt gibt es nun keine Kraftmaschine, welche im stande ist, die Arbeit zu erzeugen, die genügt, einen so großen Ballon, wie er erforderlich ist, um die Maschine nebst dem übrigen toten Gewicht zu heben, gegen einen mittelstarken Wind fortzubewegen oder auch nur auf der Stelle zu halten. Bei den Dampfern ist das Verhältnis in doppelter Hinsicht günstiger: das Wasser ist vielmal tragfähiger als die Luft und die Strömungen, gegen welche das Schiff anzukämpfen hat, haben geringere Geschwindigkeit als der Wind. Ein moderner transatlantischer Schraubendampfer, der 20 km pro Stunde bei voller Fahrt voranfährt, würde trotz Aufbietung seiner ganzen mehrtausendpferdigen Maschinenkraft bei einem entgegengesetzten Wasserstrome von der mittleren Geschwindigkeit des Windes, von etwa 10 m pro Sekunde, 16 km stündlich zurückgeschlagen werden. Also der Luftballon kann die Maschine nicht tragen, die erforderlich ist, ihn gegen den Wind zu bewegen. Aber dies gilt nur von den bisherigen Formen und dem toten Gewichte des Ballons sowie der bis jetzt existierenden Krafterzeugungsmittel; es braucht nicht als unbedingt ausgeschlossen erachtet zu werden, daß eine Kraftmaschine oder eine Energieaufspeicherungsmethode in Verbindung mit einer Vorrichtung zur Umwandlung der gesammelten Energie in mechanische Arbeit erfunden wird, bei welcher das Verhältnis zwischen Gewicht zur Arbeitsleistung wesentlich günstiger wird, und daß so das Problem des lenkbaren Ballons verwirklicht werden könne.

Allerdings ist in letzter Zeit die Mehrzahl der Flugtechniker, welche theoretisch und praktisch eingehender diese Fragen studiert haben, der Ansicht, daß der freie Flug des Menschen überhaupt nicht mittels des aerostatischen Auftriebes mit Zuhilfenahme des Ballons erstrebt werden soll, da das Fliegen auf rein mechanischem Wege möglich sein müsse, ohne Ballon, und daß man nur die Natur, die Vögel zum Vorbilde nehmen müsse, um zum freien aktiven Fliegen zu gelangen. Schließlich wird noch von manchen Sachverständigen der vermittelnde Standpunkt eingenommen, daß die Verbindung einer Flug-

maschine mit einem kleineren, besonders geformten Ballon am ehesten zum Ziele führen müsse. Ehe wir uns mit diesen neueren Bestrebungen der eigentlichen Flugtechnik beschäftigen, wollen wir noch zuvor die bisherige Entwickelung der Luftschiffahrt besprechen.

Im Jahre 1670 schlug zuerst der Jesuitenpater Lana eine ganz neue Idee vor, in die Lüfte zu steigen, welche als Vorläuferin des Luftballons zu betrachten ist; er wollte einen Körper benutzen, der leichter sei als die Luft. Die Torricellischen Versuche waren damals schon allgemein bekannt und anerkannt worden. Lanas Idee beruhte auf ganz richtigen physikalischen Prinzipien. Er wollte vier Hohlkugeln von $7\frac{1}{2}$ m Durchmesser aus Kupferblech von $\frac{1}{9}$ mm Dicke luftleer machen; zu diesem Zwecke sollten sie zuerst mit Wasser gefüllt und dann 10 m hoch gehoben werden, alsdann sollte durch Röhren das Wasser nach unten abgelassen werden, wodurch in den Hohlkugeln die Torricellische Leere entstehen mußte. Der Luftdruck auf eine solche Kugel würde etwa 290 kg betragen haben, das Gewicht der Kugel etwa 180 kg, so daß ein aktiver Auftrieb von 110 kg pro Kugel oder im ganzen 440 kg zur Wirkung gekommen wäre, welcher genügt hätte, um den Luftfahrer nebst Vorräten u. s. w. zu tragen. Es braucht kaum gesagt zu werden, daß diese Idee nicht zur Ausführung kam; die $\frac{1}{9}$ mm starken Kupferblechkugeln würden nach dem Evakuieren durch den äußeren Luftdruck zusammengedrückt worden sein, wenn sie nicht schon vorher bei der Füllung mit Wasser gerissen wären.



195. Die Brüder Stephan und Joseph Montgolfier.

Diese auf ganz korrekten und entwickelungsfähigen Grundlagen beruhende Idee Lanas wurde vergessen, und erst ein Jahrhundert später tauchte sie in anderer Form wieder auf. Zwar soll schon im Jahre 1709 der portugiesische Physiker Don Guzman einen Luftballon hergestellt haben, der aus einem mit Papier überklebten Gestell bestand und durch ein Feuer mit heißer Luft gefüllt wurde; der Erfinder wollte denselben dem Könige Johann V. vorführen, doch mißlang der Aufstieg, und weitere Versuche wurden nicht angestellt. Auch findet sich in alten Berichten eines französischen Missionars aus China die Mitteilung, daß dort schon zu Anfang des 14. Jahrhunderts in Peking bei einer großen Feier Luftballons aufgestiegen seien. Immerhin kann das Verdienst der Erfindung des Luftballons den Franzosen Gebrüder Montgolfier aus Annonay nicht bestritten werden. Der Vater der beiden war ein strebsamer und erfolgreicher Papierfabrikant, der den Wissenschaften sehr zugeneigt war; der älteste Sohn Etienne (geb. 1740, gest. 1810) studierte in Paris, wo er sich eine gute technische Ausbildung erwarb, und trat hierauf als Mitarbeiter in die Fabrik seines Vaters ein. Er, sowie auch sein jüngerer Bruder Joseph hatten einen klaren Verstand und hervorragende Erfindergabe. Im Jahre 1782 machten sie die ersten Versuche, die zu der Erfindung des Luftballons führten. Sie füllten Behälter aus Papier mit Wasserstoffgas, aber das Gas drang zu schnell durch das Papier, so daß diese Versuche aufgegeben wurden. Durch die Beobachtung, daß Dampf- und Rauchwolken in verschiedenen Höhen schwebend sich bewegen, kamen sie auf den Gedanken, daß in Papierballons gefüllter Rauch auch so in der Luft schweben müßte. Seit 1752 hatten die Experimente Benjamin Franklins die Existenz atmosphärischer Elektrizität nachgewiesen; seitdem hatte die Ansicht Geltung erlangt, daß die Leichtigkeit von Wolken und Rauch darauf beruhe, daß sie elektrisch seien. Das

Problem wurde also darin gesucht, „elektrischen Rauch“ zu erzeugen und in einer Papierhülle aufzufangen. Es wurde ein Ballon von etwa 1 cbm Inhalt hergestellt und durch Verbrennung eines Gemisches von Stroh und Wolle solcher „elektrischer Rauch“ erzeugt, welcher den darüber gehaltenen Ballon füllte. Der Versuch gelang, der Ballon stieg zu bedeutender Höhe empor. Die Erfinder erkannten noch nicht den physikalischen Grund für die Erscheinung, daß nämlich der heiße Rauch dünner und deshalb leichter sei als Luft, sie glaubten vielmehr, ein Gas mit besonderen Eigenschaften erzeugt zu haben. Nach vorherigen Ankündigungen gaben die Brüder Montgolfier im folgenden Sommer in ihrer Vaterstadt vor einer großen Anzahl von Zuschauern eine große öffentliche Vorstellung mit einem größeren Ballon; derselbe war annähernd kugelförmig mit einer Öffnung im Boden, war aus Leinwand mit Papierüberzug hergestellt und hatte etwa $10^1/_2$ m Durchmesser und 600 cbm Inhalt, sein Gewicht betrug 225 kg. Der Ballon war in $^1/_4$ Stunde gefüllt; er stieg 600 m hoch und fiel nach 15—20 Minuten zwei Kilometer vom Orte des Aufstiegs entfernt nieder. — Die Nachricht von diesem Erfolg verbreitete sich bald; die Akademie der Wissenschaften wurde durch einen Bericht auf die neue Erfindung aufmerksam gemacht, und sie setzte eine Kommission zur Prüfung derselben ein. Inzwischen wurde aber in Paris schon bald eine Summe von 10000 Frank zusammengebracht für eine Wiederholung dieses Experiments. Die Herstellung des Ballons wurde den beiden Brüdern Robert übertragen, und der junge, aber schon berühmte Physiker Professor Charles übernahm die Leitung des Unternehmens. Charles erkannte sofort die wahre Ursache für das Steigen des Ballons und erdachte alsbald ein anderes Mittel, um denselben Zweck zu erreichen, nämlich die Anwendung von Wasserstoffgas statt der heißen Luft zum Füllen des Ballons. Damals kannte man aber noch keine Methode, dieses in größeren Mengen darzustellen; man hatte es nur im Laboratorium im kleinen Maßstabe gewonnen. Nach einigen Schwierigkeiten gelang auch dieses, und der Ballon wurde gefüllt; er war aus dünner Seide hergestellt und durch einen Firnisüberzug gasdicht gemacht, hatte nur $3^1/_2$ m Durchmesser und 25 cbm Inhalt. Der Aufstieg erfolgte am 27. August auf dem Marsfelde vor einer ungeheuren Menschenmenge. In zwei Minuten stieg er etwa 1000 m hoch und verschwand in einer Wolke; nach etwa $^3/_4$ Stunden fiel er 24 km entfernt nieder, wobei er unter den nichts ahnenden Landleuten nicht geringe Aufregung verursachte. Als diese nämlich herankamen, wurden sie durch den schwefeligen Geruch des ausströmenden ungereinigten Wasserstoffgases zu der Überzeugung gebracht, daß das seltsame Ding höllischen Ursprungs sei.



196. Jacques Alexandre César Charles.

Nach diesen ersten Versuchen wurden seitdem mit warmer Luft gefüllte Ballons Montgolfieren und die mit Wasserstoff gefüllten Charlieren genannt.

Bei seinem ersten Versuche lernte Charles, daß er die Füllung des Ballons zu weit getrieben hatte; als nämlich mit zunehmender Erhebung der äußere Luftdruck abnahm, dehnte sich das Gas im Ballon stärker aus, bis ein Riß in der Seidenhülle entstand, wodurch der Ballon ziemlich schnell wieder zu Boden fiel. Bald darauf gab Montgolfier auf eine Einladung des königlichen Hofes eine Vorstellung zu Versailles vor dem Könige, der hohen Aristokratie und den Staatswürdenträgern. Er verwendete zur

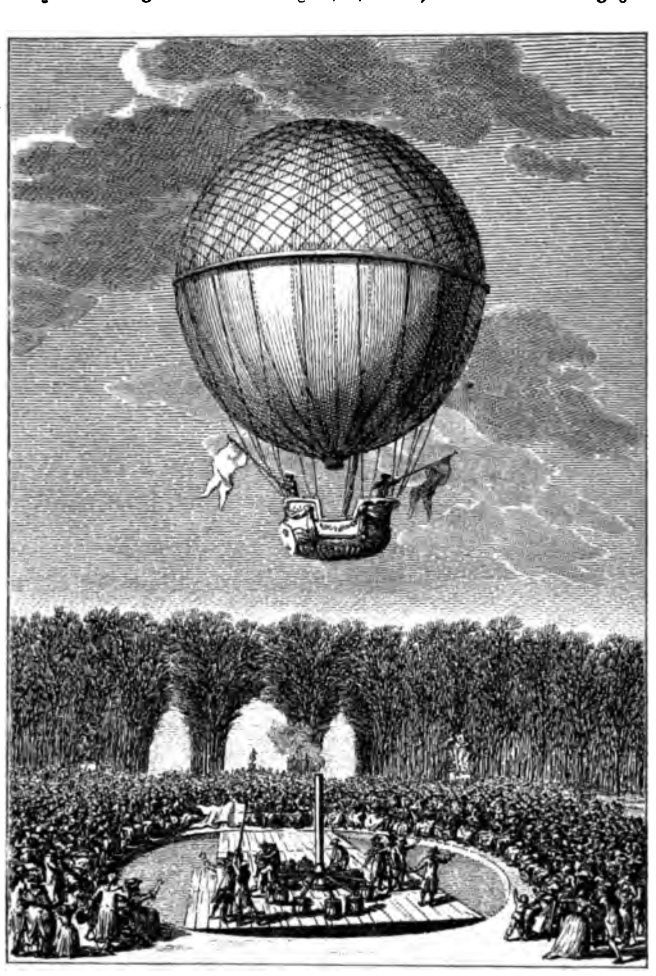
Füllung seines prächtig bemalten großen Ballons wieder den Rauch von verbrennendem gehackten Stroh und Wolle. Als erste Passagiere auf einer Luftreise wurden in eine unter dem Ballon befestigte Gondel ein Schaf, ein Hahn und eine Ente gesetzt. Dieselben wurden 1500 m hoch in die Lüfte getragen und nach einer acht Minuten dauernden Luftreise unversehrt auf den Boden gebracht. Das Publikum geriet jetzt in Enthusiasmus über die neue Kunst, und Montgolfier wurde der Held des Tages; Charles trat, obgleich sein Verfahren der Wasserstofffüllung gegenüber der Füllung mit Rauch oder warmer Luft bedeutend besser war, einige Zeit in den Hintergrund.

197. Erster Aufstieg von Menschen (Rozier und Arlande) in einer Montgolfiere am 21. November 1783 zu Paris.

Mongolfier machte jetzt bekannt, daß er selbst in einem neuen Ballon aufsteigen wolle; man wollte aber dieser Absicht zuvorkommen, indem eine Eingabe an den König Ludwig XVI. gemacht wurde, zwei zum Tode verurteilte Verbrecher zum Versuche mit einem Ballon aufsteigen zu lassen, und dieser gab seine Einwilligung hierzu. Aber ein junger Naturforscher, Pilatre de Rozier, protestierte dagegen, daß Verbrecher die Ehre haben sollten, die erste Luftreise zu machen. Rozier bot sich selbst an, diese Gefahr zu bestehen; seinen sowie seines bei Hofe angesehenen Freundes, des Marquis d'Arlande, Bemühungen gelang es, die Genehmigung des Königs zu einem Aufstieg zu erlangen. Er stieg zuerst versuchsweise in einer an einem Tau gehaltenen Montgolfiere 20 m hoch; darauf wurden die Versuche fortgesetzt, bis eine Höhe von etwa 1000 m mit dem Fesselballon erreicht wurde. Hierauf fand am 21. November 1783 im Bois du Boulogne der erste Aufstieg eines freien Ballons mit zwei Menschen, nämlich Pilatre de Rozier und dem Marquis d'Arlande, statt. Der Ballon war eine Montgolfiere von etwa 18 m Durchmesser und 3000 cbm Inhalt; er war äußerlich sehr reich ausgestattet, wie auf der Abb. 197, die den Aufstieg nach einem alten Bilde darstellt, ersichtlich ist. Die beiden kühnen Luftschiffer saßen in einem Korbe, der um die untere Öffnung des Ballons befestigt war; sie hatten einen tüchtigen Vorrat Stroh und Wolle mitgenommen, mit welchem sie ein Feuer unter der Ballonöffnung ständig unterhielten. Der Ballon stieg etwa 150 m hoch und wurde vom Winde 8 km weit fortgetragen und zwar über die Seine und den südlichen Stadtteil von Paris hinweg. Nach einer halben Stunde wurde

das Feuer mittels Wasser, das besonders zu diesem Zwecke mitgenommen worden war, ausgelöscht, und der Ballon sank ruhig und sicher zu Boden.

Zehn Tage nach der Auffahrt Roziers und d'Arlandes machten Charles und Robert mit einem viel kleineren Ballon von nur 500 cbm Inhalt eine Auffahrt. Derselbe war indessen viel besser ausgerüstet: er war mit einem Ventil zum Auslassen von Gas versehen, das durch eine Schnur von unten her geöffnet und geschlossen werden konnte; ein seidenes starkes Netzwerk umgab die obere Hälfte, welches in einen Ring zusammengefaßt wurde, der den Ballon in der Mitte umspannte und mittels Schnüre eine Gondel mit Sitzen für zwei Personen hielt. Das Gewicht der Gondel wurde also gleichmäßig von der oberen Hälfte des Ballons getragen. Im Ganzen wie in den wichtigeren Einzelheiten hatte dieser Ballon schon die Einrichtung, wie sie bis auf unsere Zeit fast allgemein gebräuchlich geblieben ist. Der Aufstieg erfolgte aus dem Tuileriengarten. Charles nahm ein Barometer und ein Thermometer mit, um in verschiedenen Höhen Luftdruck- und Temperaturmessungen zu machen. Der Ballon stieg etwa 600 m hoch und flog 40 km weit, bis der Abstieg bewirkt wurde; Charles stieg zuerst aus, in demselben Augenblicke aber, als er die Gondel verlassen hatte, stieg der Ballon plötzlich mit großer Geschwindigkeit wieder in die Höhe, da er durch die Gewichtsverringerung wieder einen großen Auftrieb erhielt. Vorher war gerade die Sonne untergegangen; Robert erblickte bei der erneuten großen Erhebung die Sonne zum zweitenmal und erlebte so nach $1/2$ Stunde einen zweiten Sonnenuntergang an einem Abend. Bei der zweiten Erhebung stieg der Ballon auf eine Höhe von über 3000 m, also 20mal so hoch, als die Montgolfiere von Rozier und d'Arlande. — Ein ungeheuer großer Ballon wurde einige Wochen später in Lyon angefertigt, von 14000 cbm Inhalt. Es war eine Montgolfiere, unter welcher bei der Fahrt das Feuer unterhalten wurde; der Ballon stieg nur 800 m hoch und blieb nur $1/4$ Stunde in der Luft. Sieben Personen nahmen an der Luftfahrt mit diesem Riesenballon teil, darunter Pilatre de Rozier und der ältere Montgolfier.

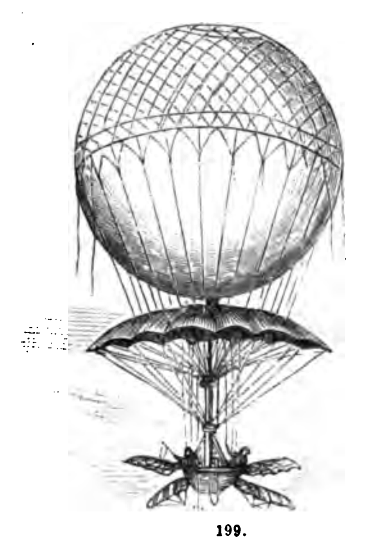


198. Erster Aufstieg von Charles und Robert mit einer Charliere im Tuileriengarten zu Paris am 1. Dezember 1783.

Hierauf folgten in Frankreich und später auch in den anderen Ländern sehr zahlreiche Ballonfahrten, von denen nur einige besonderes Interesse beanspruchen können.

Die Luftschiffahrt wurde ein Gewerbe; viele professionelle Luftschiffer traten auf, die des Gelderwerbes halber zahlreiche Aufstiege machten, wie es bis heute noch der Fall ist. Hierbei waren sie bemüht, immer neue Lock- und Reizmittel für das Publikum zu erfinden. So machte Testu-Brissy Aufstiege mit einem Ballon eigentümlicher Form und zwar auf einem Pferde sitzend.

Zu erwähnen ist hier die erste eigentliche Luftreise, nämlich eine von vornherein so beabsichtigte Ballonfahrt von England aus über den Kanal nach Frankreich, welche 1785 von Blanchard und dem Amerikaner Jefferys ausgeführt wurde. Blanchard hatte einige Jahre vorher seine langjährige Thätigkeit als Berufsluftschiffer begonnen. Beide wollten die Anwendung von Flügeln und Rudern für die Steuerung, sowie die Regulierung des Steigens und Sinkens versuchen; ferner brachte er zwischen Ballon und Gondel einen Sicherheits-Fallschirm an. Abb. 199 zeigt den so ausgerüsteten Ballon. Früher hatte schon Robert ohne Erfolg die Bewegung eines Ballons durch Ruder und später durch Flügel versucht. Der Ballon stieg, mit Ballast versehen, bei Dover auf und wurde von dem Nordwestwind alsbald über das Meer in der Richtung nach Calais getragen. Es zeigte sich gleich, daß die Füllung nicht ausreichte, und der größte Teil des Ballastes mußte zur Erleichterung schon gleich zu Anfang ausgeworfen werden; trotzdem fing der Ballon an zu sinken, als erst ein Drittel des Kanals überschritten war. Nach und nach mußte der Rest des Ballastes, die Instrumente, schweren Kleider, Anker und Ruder hinausgeworfen werden, um nicht ins Meer zu fallen. Trotzdem sank der Ballon und erreichte fast das Wasser; nur ein Mittel blieb noch übrig, das Gewicht zu verringern, nämlich in das Netzwerk des Ballons zu klettern, um die Gondel preiszugeben. Beide waren schon an den Stricken in die Höhe gestiegen, als der Ballon wieder stieg; jetzt erblickten sie Land und die Stadt Calais, und nach kurzer Zeit landeten sie in einem Walde.



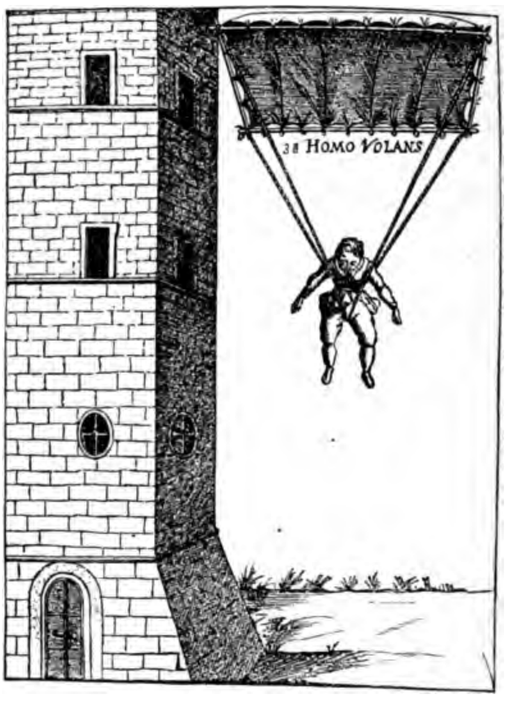
199.
Blanchards Luftballon mit Fallvorrichtung.

Ein halbes Jahr später verlor einer der ersten beiden Luftschiffer, Pilatre de Rozier, nebst einem Genossen das Leben, als sie die umgekehrte Fahrt von Frankreich nach England machen wollten. Der nach einer Idee von Rozier konstruierte Ballon bestand aus einer höchst gefährlichen Verbindung einer Montgolfiere mit einer Charliere; unter einem mit Wasserstoff gefüllten Ballon befand sich nämlich ein cylindrischer Teil, in dem die Luft durch ein darunter unterhaltenes Feuer verdünnt werden sollte. Trotz aller Warnungen, auch derjenigen seines Freundes Charles, unternahm er das Wagnis, das er mit dem Leben büßen sollte. Eine Ventilklappe funktionierte nicht, das Gas strömte aus und der Ballon stürzte zu Boden; beide Luftschiffer wurden durch den Aufschlag getötet. So wurde der erste Luftschiffer auch das erste Opfer der Luftschiffahrt.

Das Luftballonfahren wurde später überall beliebt; die Auffahrten haben seit vor hundert Jahren bis heute in den weitaus meisten Fällen zu Volksbelustigungen gedient. Von bekannteren professionellen Luftschiffern seien hier genannt: Blanchard und seine Frau; Garnerin und seine Nichte Elise; Robertson; Coxwell; Charles Green, der über 1600 Luftfahrten ausgeführt hat, und sein Sohn George; Godard, der die Seele des Luftballon-Unternehmens bei der Belagerung von Paris 1870 war; die Brüder Tissandier; die unglücklichen Crocé-Spinelli und Sivel; sowie in neuester Zeit Glaisher, der besonders eine Anzahl sehr hohe Aufstiege gemacht hat. Charles Green hat das Verdienst, zuerst an Stelle des teueren und nur umständlich herzustellenden Wasserstoffgases das Leuchtgas zur Füllung angewendet zu haben. Dasselbe ist zwar viel schwerer als ersteres, aber immer noch etwa $2^1/_2$ mal leichter als die Luft und hat den großen Vorzug,

daß es in den meisten Städten leicht ohne besondere Vorbereitungen zu erlangen ist, indem einfach der Ballon mittels eines genügend weiten Rohres an die städtische Gasleitung angeschlossen wird.

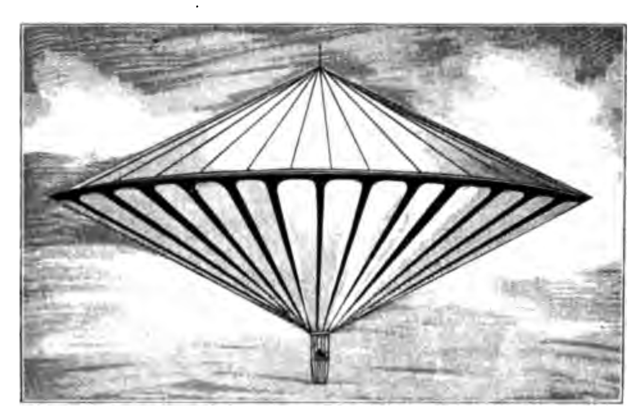
Es mögen hier noch einige Luftfahrten und Ballons erwähnt werden, welche besonderes Interesse haben. Der ältere der beiden Green stieg im Jahre 1836 einmal mit zwei Gefährten von London auf. Der Ballon flog bei Anbruch des Abends nach dem Meere zu; nachts schwebten sie über demselben, dann erblickten sie den Lichtschein der französischen Hafenstadt Calais: sie hatten den Kanal passiert. Sie flogen weiter, über Calais und andere Orte, und gegen Mitternacht über Lüttich fort, über Belgien hinweg und die Rheinprovinz. Bei Tagesanbruch landeten sie und zwar bei Weilburg in Nassau; sie hatten in 19 Stunden 670 km zurückgelegt. Einen riesigen Ballon ließ in den sechziger Jahren Nadar in Paris herstellen; der „Geant" hatte 6000 cbm Inhalt und sollte zu längeren Reisen benutzt werden. Anstatt der üblichen Gondel trug er ein aus spanischem Rohr hergestelltes Häuschen mit zwei Stockwerken; dasselbe enthielt eine völlige Ausrüstung zu einer Reise mehrerer Personen für einige Tage: Tische, Stühle, Betten, Nahrungsmittel, photographische Apparate und Instrumente. Nach der ersten Auffahrt fiel der Ballon bald wieder zur Erde. Eine zweite Fahrt ging zwar anfangs besser, endete aber recht gefährlich; der Luftschiffer Godard hatte die Führung, und außer ihm fuhren noch acht Personen mit, darunter Nadar und seine Frau. Man fuhr die Nacht hindurch und zwar nicht sehr hoch; gegen Morgen glaubten die Luftschiffer, sich über Holland zu befinden, und da sie die Nähe des Meeres fürchteten, sollte gelandet werden. Aber das Ventil öffnete sich nicht genug, und der Ballon sank zwar, behielt aber zu viel Auftrieb; nachdem das Häuschen den Boden berührt hatte, erhob er sich gleich wieder in die Höhe. Von einem heftigen Winde getrieben, raste nun das Luftschiff eine Zeitlang in großen Sprüngen über die Felder, Hecken und Gräben; der Anker war schon anfangs verloren gegangen. Die Fahrt ging über einen Eisenbahndamm hinweg, wobei die Telegraphenleitungen zerrissen wurden; im Innern war bei dieser schrecklichen Fahrt alles unter- und durcheinander geworfen worden. Jetzt wurde durch Auswerfen von Ballast der Ballon wieder zum Steigen gebracht; dann stieg Nadar in das Netzwerk, um das Ventil ganz zu öffnen, es gelang, und endlich senkte sich der Ballon ganz zu Boden. Der Wind trieb ihn aber in ein Gehölz, wo er in den Bäumen hängen blieb. Alle hatten mehr oder weniger schwere Verletzungen, Knochenbrüche und schwere Quetschungen erlitten, doch kamen alle mit dem Leben davon. Der Ballon war in Deutschland in der Nähe der Weser niedergegangen.



200. Homo volans.

Der Fallschirm. Mit der zunehmenden Häufigkeit der Luftballonfahrten wurde man darauf bedacht, Sicherheitsvorrichtungen zu erfinden für den Fall von Unglücksfällen, wenn z. B. der Ballon zerriß, oder durch Undichtigkeiten oder Versagen des Ventils das Gas ausströmte, wie es häufiger vorgekommen war. Um in solchen Fällen die Geschwindigkeit und die Gewalt des Niedersturzes zu verringern, wandte man Fallschirme in verschiedener Form und Konstruktion an. Die ersten Vorschläge zu einer Vorrichtung, um „aus jeder Höhe, mag sie noch so groß sein, ohne Furcht vor Gefahr herabstürzen zu können", wurden schon von dem früher genannten berühmten italienischen Maler und Naturforscher Leonardo da Vinci gemacht; er wollte hierzu ein gesteiftes viereckiges Zelt verwenden. An diesen Vorschlag erinnert eine Beschreibung nebst Abbildung in einem 1695 erschienenen Buche, betitelt „Neue Maschinen", über den „homo

volans“ (fliegenden Menschen; s. Abb. 200). Zum praktischen Gebrauche ausgebildet und zum erstenmal wirklich verwendet wurde der Fallschirm wohl von dem Franzosen Sébastien Lenormand zu Montpellier 1783. Er bildete aus zwei mit den Stöcken verbundenen Regenschirmen von 1,62 m Durchmesser einen Fallschirm, mit dem er von einem Baum herabsprang. Die Enden der Fischbeinrippen der Schirme wurden so verbunden und versteift, daß der Schirm nicht umschlagen konnte. Er konstruierte auch einen größeren Fallschirm, welcher aus gedichteter Leinwand bestand und ausgespannt einen Kegel von 4 m Durchmesser und 2 m Höhe bildete; am unteren Umfange waren eine Anzahl Schnüre befestigt, die den Menschen tragen sollten. Die Konstruktion wurde sehr bekannt; Montgolfier und Blanchard machten von größeren Höhen Experimente mit denselben, doch nur mit Tieren oder Gewichten, dagegen wagte zuerst Garnerin 1797 zu Paris einen Absturz aus einem Ballon. Er benutzte hierzu einen genau in der Form eines gewöhnlichen Regenschirms konstruierten Fallschirm von 7,8 m Durchmesser; beim Niedergehen pendelte der Fallschirm heftig hin und her, und der Aufprall auf der Erde war nicht gerade ganz sanft, so daß der kühne Luftschiffer sich den Fuß verstauchte. Um das Pendeln zu verhindern, wurde später an den Fallschirmen in der Mitte oben ein Loch gemacht, durch welches die unter dem Schirm zusammengedrückte Luft kontinuierlich entweichen konnte. Später ist das Beispiel Garnerins häufig nachgeahmt worden; besonders seine Frau, eine Luftschifferin, die ihm an Waghalsigkeit nichts nachgab, sprang häufig bei einem Ballonaufstieg aus großer Höhe mit ihrem Fallschirm herab. Bei guter, vor allen Dingen solider Konstruktion sichert derselbe in der That eine genügende Verlangsamung der Fallgeschwindigkeit, um ohne starken Aufprall sanft zu Boden zu kommen. Einen direkt unter dem Ballon befestigten Fallschirm als Sicherheitsvorrichtung wendete Blanchard an, wie schon erwähnt wurde.



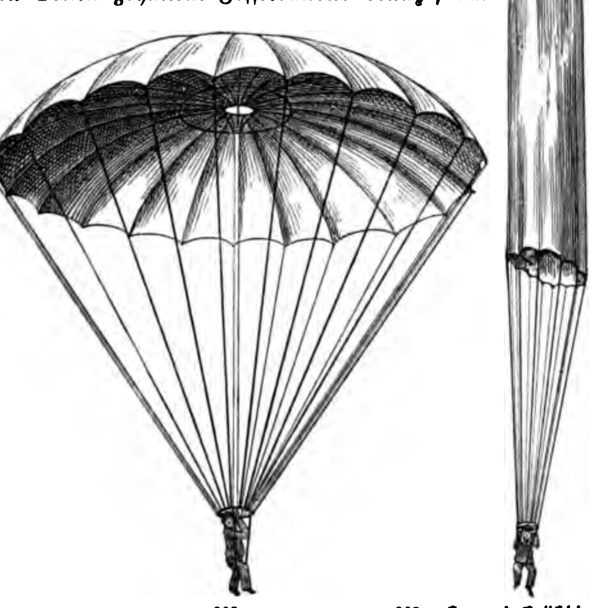
201. Cockings Fallschirm.

Um die Schwankungen ganz zu beseitigen, bildete der Engländer Cocking auf Grund wissenschaftlicher Untersuchungen einen umgekehrten Fallschirm mit der offenen Seite nach oben (s. Abb. 201). Seine theoretischen Darlegungen fanden Beifall; als er aber 1836, sich auf die Richtigkeit seiner Theorie verlassend, einen Absturz aus großer Höhe wagte, mußte er seine Waghalsigkeit mit dem Leben büßen. Trotz ernstester Warnungen stieg er mit dem Luftschiffer Green von Vauxhall in London unter der Gondel des Luftballons mit seinem Fallschirm auf und schnitt bei etwa 1000 m Höhe das Verbindungsseil durch. Kurz darauf fand man seinen zerschmetterten Leichnam in der Nähe der Überreste des Fallschirmes. Große Reklame mit einem neuen „doppelten Fallschirm“ machte Robertson; trotz seiner großartigen Ankündigungen und schönen Bilder hat er aber nie daran gedacht, wirklich seine „Erfindung“ mit eigener Gefahr zu probieren.

Einen „lenkbaren Fallschirm“ erfand der Franzose Letur; derselbe bestand aus einem großen Schirm mit Ruderflügeln und einem Steuer. Er ließ sich 1854 zu London von dem Luftschiffer Adam mit einem Ballon in die Höhe nehmen; als aber programmmäßig die Seile durchschnitten werden sollten, zeigte sich, daß dieselben mit dem Fallapparat verwickelt waren. Der Ballon war in starkem Fallen begriffen, der Fallschirm konnte nicht gelöst werden, und der unglückliche Letur wurde vor der Landung durch einen Wald geschleift und getötet.

Zum Schluß sei noch die Fallschirmkonstruktion von Leroux erwähnt, der dieselbe im letzten Jahrzehnt vielfach auch in Deutschland vorgeführt hat. Der Schirm ist aus Seide hergestellt und bildet im ausgespannten Zustande eine Kugelkalotte von 10 m unterem Durchmesser (Abb. 202) mit einem 15 cm großen Loch oben in der Mitte. Eine Anzahl am Rande des Schirmes befestigter Schnüre vereinigen sich in einem Ring, in dem der Luftschiffer hängt. Im geschlossenen Zustande bildet der Schirm einen langen Sack, indem der untere Umfang durch einen leichten Holzring zusammengehalten wird; dieser Ring ist hinter Schnüren, die von der Peripherie nach der Mitte gehen, beweglich. Leroux hielt beim Absprung vom Ballon diesen Ring kurze Zeit durch eine Schnur fest, so daß der Schirm sich nicht entfalten konnte; er stürzte also anfänglich mit unheimlicher Geschwindigkeit herab, was bei Schaustellungen immer eine besonders aufregende Wirkung auf die Zuschauer hatte; dann ließ er die Schnur los, der Holzring rutschte hinter den inneren Schnüren in die Höhe und der Schirm entfaltete sich unter dem von unten wirkenden Luftdruck.

Militärische Luftschiffahrt. Schon vor längerer Zeit haben die Franzosen in Kriegen an langen Seilen gehaltene Fesselballons benutzt, um aus der Höhe die feindlichen Positionen zu erforschen. Im nordamerikanischen Bürgerkriege hat ein Luftschifferkorps wichtige Dienste geleistet. Am bekanntesten ist die Verwendung des Luftballons bei der Belagerung von Paris im letzten deutsch-französischen Kriege geworden. Außer Fesselballons, welche zur Auskundschaftung der deutschen Stellungen und Truppenbewegungen dienten, sind während der Belagerung im ganzen nicht weniger als 65 Ballons aufgestiegen und nach den verschiedensten Gegenden geflogen. Von diesen sind fünf in die Hände der Deutschen gefallen und zwei verschwunden, also verunglückt. Die Ballons dienten dazu, den Nachrichtenverkehr mit den Provinzen aufrecht zu erhalten, nachdem die Einschließung ganz vollendet war und alle Verbindungsmittel, auch die unterirdischen Telegraphenleitungen abgeschnitten waren. Die Ballons waren fast alle von gleicher Konstruktion und Größe, mit etwa 2000 cbm Inhalt. Es wurden teils nur Briefe und Depeschen, teils auch Personen mit befördert. So verließ Gambetta in einem Ballon die Stadt, um bald darauf in den noch nicht von den deutschen Heeren besetzten Provinzen die nationale Verteidigung zu organisieren und den „Krieg bis aufs Messer“ fortzuführen. Es wurden auch zahlreiche Brieftauben mit den Ballons aus Paris mitgenommen, welche wieder aus der Provinz wichtige Nachrichten nach der Hauptstadt zurückbrachten.



202. Leroux' Fallschirm. 203. Leroux' Fallschirm beim Absprung geschlossen.

Freilich verfehlte mancher der Ballons arg sein Ziel. Eine abenteuerliche Fahrt machten im November ein Luftschiffer und ein Offizier, welche Gambetta wichtige Nachrichten über einen beabsichtigten großen Ausfall Trochus überbringen sollten. Sie stiegen abends aus Paris auf und fanden sich bei Tagesanbruch zu ihrem Schrecken über dem offenen Meere, ohne rings herum Land erspähen zu können. Sie sahen viele Schiffe unter sich herfahren, aber ihre Signale wurden nicht bemerkt, oder es gelang den Schiffen

nicht, in solche Nähe zu kommen, daß eine Rettung hätte versucht werden können. Als der Ballon schon sehr an Steigkraft eingebüßt hatte und der Ballast beinahe ganz ausgeworfen war, kamen sie an Land; sie sprangen glücklich aus der Gondel, worauf der Ballon sich sofort wieder in die Lüfte erhob. Nun mußten sie in dem gänzlich fremden, schnee- und eisbedeckten Lande noch lange, hungrig und frierend, umhersuchen, bis sie Hilfe fanden, und es stellte sich heraus, daß sie in Norwegen gelandet waren.

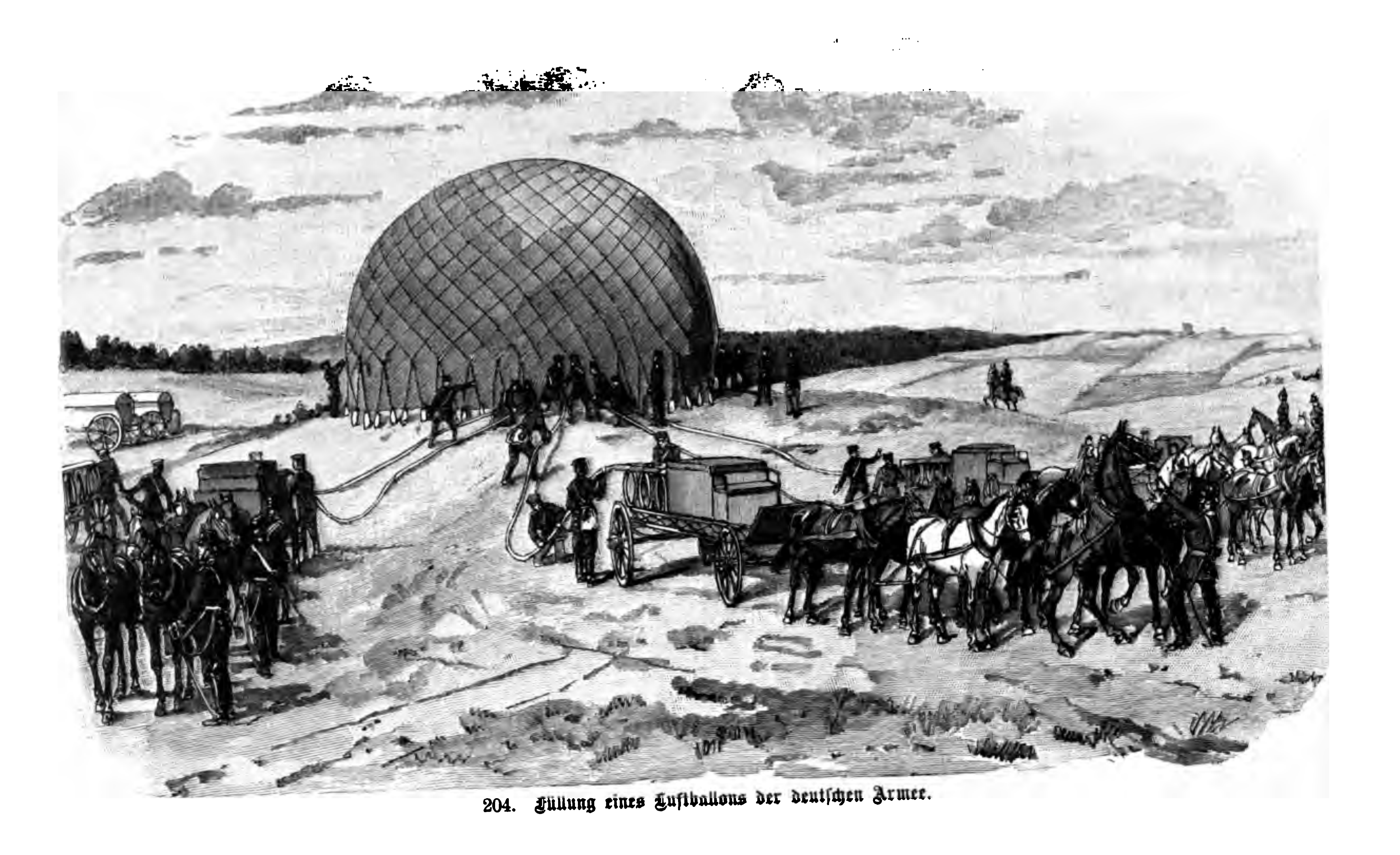
Auch in unserer Armee ist der Luftschiffahrt seit Jahren große Aufmerksamkeit gewidmet worden. Es ist eine aus auserlesenen Offizieren und Mannschaften zusammengesetzte Luftschifferabteilung gebildet worden, welche zahlreiche Übungsfahrten mit eignen Ballons gemacht haben.

Die übliche Füllung der Luftballons mit Leuchtgas aus den städtischen Gaswerken ist natürlich für die Militärluftschiffahrt zwar für Versuchsfahrten im Frieden, aber nicht im Kriege anwendbar. Die Füllung bildete lange eine große Schwierigkeit, ja von einer kriegsbrauchbaren einfachen Methode derselben mußte die ganze Zukunft der Militärluftschiffahrt abhängen. Seit einigen Jahren ist auch diese Frage durch ein System gelöst, das die englische Regierung schon länger angewandt hat und das durch Verrat allgemein bekannt geworden ist. Das Gas wird nicht mehr im Felde in der früher üblichen, umständlichen Weise hergestellt, wozu ein Train von 30 Wagen die Apparate und Materialien herbeischaffen mußte, es wird jetzt in Stahlcylindern fertiges Wasserstoffgas unter 120 Atmosphären Druck mitgenommen. Jeder Behälter ist 2,4 m lang bei nur 13 1/2 cm Durchmesser und enthält 3,9 cbm Gas. Für die Füllung wird durch eine Vorrichtung der Inhalt von 34 oder 68 solchen Behältern gleichzeitig in den Ballon geleitet. Für die gewöhnliche Größe der Feldballons von etwa 300 cbm Inhalt sind 80 solche Behälter erforderlich. Abb. 204 stellt die Füllung eines Ballons der deutschen Luftschifferabteilung im Manöver dar. Die Trainwagen mit den Vorratscylindern werden um den zu füllenden Ballon aufgestellt, und die Rezipienten werden gleichzeitig oder nacheinander durch Schläuche mit dem Ballon verbunden. In der Abbildung sehen wir den Ballon bereits halb gefüllt.

Die französische Militärverwaltung benutzt größere Behälter, welche fest auf Wagen montiert sind; ein Wagen soll 300 cbm auf 200 Atmosphären zusammengedrücktes Gas mit sich führen, so daß für die Füllung der normal 540 cbm fassenden französischen Militärballons zwei Wagen ausreichen. Die Füllung soll in 1/4 Stunde bewirkt werden können, während früher für die Gasbereitung, wenn alles zur Stelle und gut in Ordnung war, mindestens 3—4 Stunden erforderlich waren. Jetzt kann also vor Beginn oder während einer Schlacht ein Ballon an beliebiger Stelle in kürzester Zeit zum Aufstieg bereit gemacht werden, während es früher eintreten konnte, daß der Ballon erst in die Höhe kam, wenn es keinen Zweck mehr hatte.

Bei der Militärluftschiffahrt handelt es sich in Manövern sowohl wie im Feldzuge fast nur um Fesselballons. Nur zum Verlassen eingeschlossener Festungen, wie bei dem erwähnten Beispiele der Belagerung von Paris, bedient man sich freier Ballons. Die Fesselballons läßt man bei ruhigem Wetter bis zu 600 m Höhe steigen; von hier aus lassen sich auf weite Entfernungen vortreffliche Beobachtungen anstellen. Die Verbindung zwischen der Besatzung des Ballons mit der Truppe geschieht durch ein Telephon, dessen Drähte in dem Haltetau verborgen sind; auch können Skizzen oder schriftliche Mitteilungen in einer Büchse an einer Schnur herabgelassen werden und umgekehrt. Der Fesselballon wird entweder an einem einzigen starken, aber nicht dicken Drahtseil gehalten, welches mittels einer auf einem Wagen befestigten Winde gleichmäßig abgelassen oder eingeholt wird, oder durch vier Haltetaue von Mannschaften gehalten. Mittels derselben kann der Ballon beliebig im Terrain hin- und hergeführt werden; dies ist wichtig wegen der feindlichen Beschießung. Auf 1500 m Entfernung bietet der Ballon noch ein Ziel für das Feuer der modernen Gewehre, und auf 5 km Entfernung ist noch Artilleriefeuer wirksam, wenn die Artillerie Zeit hat, sich einzuschießen; um dies zu verhindern, wird fortwährend die Stellung des Ballons verändert.

Gefahren der Luftschiffahrt. Seit der Erfindung des Luftballons sind viele Tausend Aufstiege von Menschen erfolgt, und hierbei sind nach den Aufzeichnungen etwa



204. Füllung eines Luftballons der deutschen Armee.

50 ums Leben gekommen, davon die meisten in Feuer-Luftballons (Montgolfieren), obwohl die Gesamtzahl der Aufstiege mit diesen gegen diejenige mit Gasballons verschwindend ist. Die Gefahr von Luftfahrten mit letzteren ist also keineswegs sehr groß; abgesehen von unerwarteten Naturereignissen, z. B. Gewittern, bestehen die Gefahren hauptsächlich beim Aufsteigen und besonders bei der Landung. Beim Aufstieg kann der Ballon vom Winde gegen in der Nähe befindliche hohe Gebäude, Türme, Schornsteine geschleudert werden; bei der Landung kommt es darauf an, einen geeigneten Ankerplatz zu finden, also ein freies Feld, eine Wiese oder einen Acker, wo der an einem Tau ausgeworfene Anker gleich festhakt. Wenn derselbe nicht festhakt, dann kann der Ballon vom Winde lange Strecken über den Boden geschleift werden, oder der Ballon springt in riesigen, bogenförmigen Sätzen über das Feld, indem beim jedesmaligen Aufschlagen der Gondel der Ballon momentan entlastet wird und mit neuem Auftrieb steigt, bis das Gas so weit entwichen ist, daß das Fahrzeug liegen bleibt. Noch gefährlicher ist es, wenn der Abstieg über einem ausgedehnten Walde oder gar über einer Stadt erfolgt und der Ballon nicht mehr so lange in der Höhe gehalten werden kann, bis freies Feld erreicht wird. Dann kann die Gondel über die Gipfel der Bäume oder die Dächer der Häuser fortgerissen werden, bis sie zertrümmert ist oder im günstigeren Falle irgendwo sich festhakt.

In der höheren Luft während der Fahrt ist eigentlich die Gefahr gering, vorausgesetzt, daß der Ballon dicht und stark ist, so daß er nicht zerreißt oder zu viel Gas verliert, ferner, daß das Ventil gut funktioniert, und schließlich, daß er genug Steigkraft und reichlich Ballast hat. Hierdurch kann nach Belieben das Steigen und Fallen geregelt werden: um in die Höhe zu steigen, wird einer der außen an der Gondel hängenden Sandsäcke entleert; um zu fallen, das Ventil geöffnet, so daß Gas ausströmt. Wind, selbst von einiger Heftigkeit, hat keine so schlimmen Wirkungen, wie man wohl meinen könnte, denn der Ballon bildet gleichsam selbst einen Teil des Luftstromes, er bewegt sich mit derselben Geschwindigkeit wie die Luft, und der Luftschiffer bemerkt vom Winde ebenso wenig, wie der Reisende in einem Eisenbahnzug von der Geschwindigkeit des letzteren.

Bei großen Höhen liegt oder lag vielmehr früher die Hauptgefahr in den Atmungsbeschwerden! Dieselben sind in neuerer Zeit genauer studiert worden; sie beruhen einesteils auf dem viel geringeren Luftdruck, der in großen Höhen herrscht, und welchem der menschliche Körper in der kurzen Zeit des Aufstieges eines Ballons sich nicht anpassen kann, anderseits in der zu geringen Menge Sauerstoff, den die dünne Luft enthält, und die für die Atmung nicht ausreicht. Es finden dieselben Erscheinungen statt, wie man sie bei Besteigung sehr hoher Berge beobachtet, und welche unter dem Namen Bergkrankheit zusammengefaßt werden. Es tritt starke Ermüdung und Mattigkeit ein; starker Blutandrang zum Kopf, Schwindelanfälle, blaue bis schwärzliche Färbung der Lippen, Blutergüsse aus Mund und Ohren, schließlich kann der Erstickungstod eintreten. Professor Paul Bert zu Paris wies durch Versuche an Tieren, sowie an sich selbst nach, daß hauptsächlich der Sauerstoffmangel die Ursache hiervon ist. Er setzte sich in einen luftdichten Kasten und ließ die Luft durch eine Luftpumpe stark verdünnen: alle Erscheinungen wie beim Luftballonfahren oder Bergsteigen stellten sich ein; sobald er aber aus einem Behälter Sauerstoff einatmete, waren körperliche und geistige Erschlaffung mit einem Schlage beseitigt. Die Wichtigkeit dieser Entdeckung für die Luftschiffahrt wurde sogleich erkannt; man brauchte nur einen genügenden Vorrat komprimiertes Sauerstoffgas mitzunehmen, um in Höhen steigen zu können, welche früher wegen der Lebensgefahr nicht erstrebt werden konnten. Der erste Versuch, mit Sauerstoff versehen in sehr große Höhen zu steigen, brachte aber doch zwei Luftschiffern, Sivel und Crocé-Spinelli, den Tod. Beide, sowie auch der dritte, der die verhängnisvolle Fahrt mitmachte, Gaston Tissandier, waren wohl erfahrene, kenntnisreiche und umsichtige Aeronauten; sie stellten bei ihren Luftreisen auch wissenschaftliche Beobachtungen an und wurden aus diesem Grunde von der französischen Regierung sowie wissenschaftlichen Gesellschaften unterstützt. Bei einem früheren Aufstieg im Jahre 1874 war die Höhe von 7400 m erreicht worden; nach den Versuchen Paul Berts setzten sich die drei mit diesem in Verbindung, und sie beschlossen,

im folgenden Jahre gemeinschaftlich eine Fahrt zu unternehmen, um eine noch bedeutendere Höhe zu erreichen. Der Aufstieg geschah mit dem Sivel gehörigen Ballon „Zenith", mit einer vollständigen Ausrüstung für die verschiedensten wissenschaftlichen Beobachtungen und Untersuchungen, sowie einigen Behältern Sauerstoff. Der Vorrat muß aber zu knapp gewesen sein; sie gingen deshalb zu sparsam mit demselben um, wagten sich erst zu stärken, als die Gefahr schon groß war. Über den ganzen Hergang der Fahrt hat der einzige Überlebende, Tissandier, berichtet. Bei einer Höhe von 7000 m und einer Lufttemperatur von 10 ° unter 0 fühlten sie sich sehr schwach und atmeten Sauerstoff, was sie wieder stärkte; dann wurde nochmals Ballast ausgeworfen, und der Ballon stieg rapide über 8000 m hinaus. Tissandier wurde schwindlig und so schwach, daß er den Schlauch des Sauerstoff-Atmungsapparates nicht mehr erreichen konnte, er fiel in Ohnmacht. Als er wieder zu sich kam, fiel der Ballon schnell. Sivel und Crocé lagen bewußtlos in der Gondel, dann fiel Tissandier selbst wieder in halbe Bewußtlosigkeit, er erinnerte sich dunkel, bemerkt zu haben, daß Crocé wieder zu sich kam und Ballast, sowie den Inhalt der Gondel auswarf. Der Ballon sank mit großer Geschwindigkeit nieder. Tissandier kam wieder so weit zu sich, daß er mit Aufbietung aller Kräfte den Anker lösen und nach der Landung das Ventil öffnen konnte; seine beiden Genossen waren aber inzwischen gestorben.

Seit dieser Fahrt ist ein ähnliches Unglück nicht wieder vorgekommen; wenn jetzt Luftfahrer für wissenschaftliche Zwecke in große Höhen steigen wollen, versehen sie sich mit ausreichendem Vorrat an Sauerstoff, so daß sie sich von einer gewissen Höhe ab regelmäßig mit demselben stärken können.

In der neuesten Zeit werden Luftschiffahrten vorzugsweise noch zu militärischen und wissenschaftlichen Zwecken unternommen; Männer der Wissenschaft steigen in Ballons von sorgfältigster Konstruktion und Ausrüstung, mit genauen und sicheren Apparaten und Meßinstrumenten versehen, in die Lüfte, um Kenntnisse über die höheren Schichten unserer Atmosphäre zu gewinnen, über Temperatur, Feuchtigkeitsgehalt, Richtung und Stärke der Luftbewegung, elektrisches Verhalten der Luft und der Wolken u. s. w. Die Luftschiffahrt ist mehr und mehr aus dem Stande eines müßigen, gefahrvollen Sportes in denjenigen einer ernsten, geregelten, bestimmte Ziele verfolgenden, wissenschaftlich fruchtbringenden Thätigkeit gestiegen.

Ausnahmsweise sind allerdings schon früh, bald nach der Erfindung des Ballons, Luftfahrten zu wissenschaftlichen Zwecken unternommen worden; so stieg schon 1784 der Amerikaner Dr. Jeffries in einem Luftballon in die Höhe, um Temperatur und Feuchtigkeit der Luft in größeren Höhen zu messen und Luftproben mit herabzubringen. Man war besonders schon seit langer Zeit bestrebt, möglichst große Höhen mit dem Ballon zu erreichen; so kamen im Jahre 1803 Robertson und L'Holst in Hamburg bei einem Aufstieg angeblich auf 7400 m Höhe. Um die wissenschaftlichen Beobachtungen dieses, sowie eines späteren Aufstieges Robertsons in St. Petersburg genauer auf ihre Richtigkeit zu untersuchen, unternahmen im Auftrage der französischen Akademie zwei tüchtige jüngere Mitglieder derselben, Gay-Lussac und Biot, im Jahre 1804 mit vorzüglicher Ausrüstung einen Aufstieg bis zu 4000 m Höhe; kurz darauf stieg Gay-Lussac noch einmal allein auf mit der Absicht, so hoch wie überhaupt möglich in die Höhe zu kommen, und stieg bis 9000 m, die größte Höhe, die vor ihm und lange nach ihm erreicht wurde.

Später haben sich besonders Green, der in Deutschland durch seine zahlreichen Luftfahrten, besonders von Leipzig aus, bekannt gewordene Coxwell und in England Glaisher durch Erreichung sehr bedeutender Höhen ausgezeichnet. Letzterer unternahm auf Anregung und in Verbindung mit englischen Gelehrten und wissenschaftlichen Gesellschaften in den Jahren 1862—1866 eine Serie von 28 Aufstiegen mit dem Ziele, bis in die größte erreichbare Höhe zu steigen, welche viel wertvolles, wissenschaftliches Material gebracht haben. Die bemerkenswerteste erfolgte 1862 zusammen mit Coxwell von der englischen Stadt Wolverhampton aus. In 45 Minuten wurde eine Höhe von 8000 m erreicht; hier wurde Glaisher schwach, und 1500 m höher verlor er die Gebrauchsfähigkeit seiner Glieder und fiel ohnmächtig auf den Rücken. Die Temperatur war — 15 ° C.

und der Barometerstand 25 cm. Coxwell wollte jetzt das Ventil ziehen, aber die Schnur hatte sich verwickelt, und er mußte in das Netzwerk klettern, um sie zu lösen. Als er wieder in die Gondel zurückkam, waren seine Hände erfroren, aber es gelang ihm, mit den Zähnen die Ventilleine zu ziehen und so viel Gas auszulassen, daß der Ballon zu sinken anfing. Bald darauf gewann Glaisher wieder das Bewußtsein, und sofort begab er sich wieder an die Aufzeichnung seiner Instrumentenanzeigen. Während seiner Bewußtlosigkeit hatte Coxwell den niedrigsten Barometerstand von 18 cm beobachtet, die erreichte Höhe berechnete sich hiernach auf 11 000 m; die Temperatur war hierbei nach Ausweis eines Minimumthermometers auf — 25° C. gesunken. 1 $1/2$ Stunde nach der Auffahrt landeten beide.

Von den Resultaten der Beobachtungen bei den vielen Luftfahrten Glaishers sei erwähnt, daß über Westeuropa ein warmer Luftstrom von Südwesten her in etwa 600 m vertikaler Stärke zieht, ähnlich wie der Golfstrom im Atlantischen Ozean. Die frühere Annahme, daß mit je 90 m Höhe die Temperatur um 1° sinkt, wurde als unrichtig nachgewiesen; je größer die Höhe, desto langsamer findet die Temperaturerniedrigung statt. Ferner fand Glaisher, daß in größerer Höhe die Windgeschwindigkeit größer ist, als nahe über dem Erdboden.

Der zu wissenschaftlichen Zwecken unternommene, so unglücklich ausgegangene Aufstieg der drei Aeronauten Gaston Tissandier, Sivel und Crocé-Spinelli im Jahre 1875 ist schon oben erwähnt worden.

In Deutschland haben im letzten Jahrzehnt besonders die Erfahrungen und Erfolge der Militärluftschifferabteilung und des „Deutschen Vereins zur Förderung der Luftschiffahrt“ in Berlin, welcher von der Regierung unterstützt wird und hervorragende Männer der Wissenschaft zu seinen Mitgliedern zählt, sehr viel zur Entwickelung der Ballonfahrttechnik, hauptsächlich zu wissenschaftlichen Zwecken, beigetragen.

Der neue Ballon „Phönix“ des Vereins stellt zur Zeit wohl das Vollkommenste seiner Art dar. Er ist kugelförmig und hat 17 m Durchmesser und 2 630 cbm Inhalt. Sowohl Ballon wie Ausrüstung sind außerordentlich sorgfältig, unter Benutzung aller Hilfsmittel der Technik und aller Erfahrungen hergestellt und zeigen manche Abweichungen gegen die bisherige Praxis. So ist die Hülle nicht aus Seide, sondern aus gummiertem Baumwollenstoff hergestellt; sie ist fast absolut gasdicht und hat eine bedeutende Festigkeit. Die Füllung besteht gewöhnlich aus Leuchtgas; für große Höhen wird, um eine größere Steigkraft zu erlangen, eine Mischung von diesem mit Wasserstoff verwendet. Für die Landung hat der Phönix außer dem Anker einen 150 m langen Schleppgurt, der vor der Landung über den Boden schleppt und so den Ballon aufhält; anderseits entlastet er ihn, da das über dem Boden liegende schleppende Stück nicht mehr getragen zu werden braucht. Der Ballon fährt so ruhig in geringer Höhe über der Erde fort, bis ein geeigneter Ankerplatz gefunden ist, der Anker ausgeworfen und das Landungsventil geöffnet wird. Auf die Weise ist das früher gefährliche Landen sehr erleichtert worden. An Ballast wird bei den Fahrten 700—1500 kg Sand mitgenommen. Es fahren meist zwei Personen bei den Aufstiegen mit; bei Hochfahrten wird ein Behälter mit komprimiertem Sauerstoff für die Unterstützung der Atmung mitgenommen. Das Gesamtgewicht des Ballons mit Gondel, Ausrüstung, Vorräten, Instrumenten beträgt 800 kg.

Die meisten Freifahrten des Vereins sind von dem Ballonplatz bei der technisch-physikalischen Reichsanstalt zu Charlottenburg ausgegangen; die meisten sind mit dem älteren Ballon „Humboldt“ (2500 cbm groß, bis 1893) und dem beschriebenen neuen „Phönix“ ausgeführt worden. Die Fahrten wurden zu allen Jahreszeiten, zum Teil auch nachts unternommen; die meisten dauerten über fünf Stunden, mehrere über zehn Stunden und eine 19 Stunden. Bei einer Fahrt des „Cirrus“ wurde eine Strecke von über 1000 km in der Luft zurückgelegt, und der Ballon landete in Bosnien. Die größte von den Luftschiffern genau bestimmte Höhe von 9150 m wurde im Winter 1894 mit dem „Phönix“ erreicht. Bei einer anderen, vom Hauptmann Groß der Luftschifferabteilung geleiteten Auffahrt mit demselben Ballon wurden mit ausgezeichneten Instrumenten die besten bis dahin gewonnenen genauen Messungen und Beobachtungen in Höhen bis 7930 m

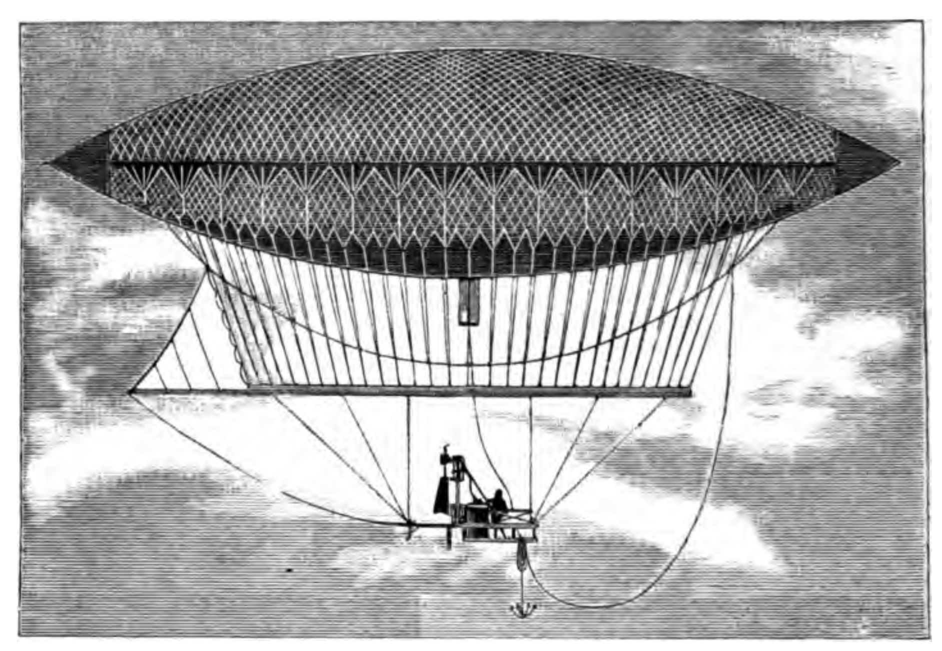
angestellt. Bei diesen Fahrten wurde in den höchsten Luftschichten eine Temperatur von 48° C. unter Null beobachtet. — Trotz des bedeutenden Hilfsmittels, welches die Mitnahme von Sauerstoff zum Atmen für Auffahrten in große Höhen bietet, wird es nach den Erfahrungen für Menschen doch wohl unmöglich bleiben, ohne direkte große Todesgefahr weit über 9000 m Höhe im Ballon zu steigen. Zur Erforschung der Atmosphäre in noch bedeutend größeren Höhen hat man indessen doch ein Mittel gefunden in den sogenannten Registrierballons. Man hat Apparate konstruiert, welche selbstthätig fortlaufend während einer gewissen Zeit genau die Temperatur und den Luftdruck messen und aufzeichnen; solche werden auf sorgfältigste Weise an kleineren Ballons untergebracht, die mit möglichst geringer Belastung und starkem Auftrieb frei aufsteigen. Wenn es gelingt, einen solchen Registrierballon mit den unbeschädigten Instrumenten nach dem Niederfallen zurückzuerhalten, dann geben die Diagramme der Instrumente — vollkommenes Funktionieren derselben vorausgesetzt, wie es bei den neuesten Konstruktionen erreicht ist — sichere Auskunft über die Verhältnisse in Höhen, die niemals ein menschliches Wesen erreicht hat. Der Registrierballon „Cirrus", der im September 1894 gleichzeitig mit zwei bemannten Ballons, „Phönix" und „Majestic", aufstieg, kam nach $6^3/_4$ stündiger Fahrt in Rußland wohlbehalten zur Erde zurück; die Registrierungen ergaben, daß der Ballon bis 18 450 m Höhe gestiegen war und daß in dieser Höhe eine Temperatur von — 67° C. geherrscht hat; dies übersteigt die größte irgendwo auf der Erdoberfläche beobachtete Kälte, welche — 63° C. in Ostsibirien war. An dem Tage dieses Aufstieges herrschte auf der Erdoberfläche Windstille; der in etwa 3000 m Höhe sich bewegende „Phönix" flog dagegen durch die hier herrschende Luftströmung mit einer Geschwindigkeit von durchschnittlich 3 m pro Sekunde, während der „Cirrus" in 18000 m Höhe mit einer Sturmgeschwindigkeit von 40 m pro Sekunde weitergeflogen ist. Hierdurch wurde also das wissenschaftlich wichtige Resultat gewonnen, daß in größeren Höhen ganz andere Luftbewegungen herrschen können, als an der Erdoberfläche. In Höhen über 7000 m ist der Wechsel der Jahreszeiten verschwunden; hier herrscht ewige grimmige Kälte.

Die bisher gewonnenen spärlichen Beobachtungsresultate aus höheren Luftschichten durch bemannte Ballons und Registrierballons lassen uns auch den Grund erkennen, weshalb bisher die Wissenschaft der Witterungskunde nur so verhältnismäßig geringe Fortschritte gemacht hat. Alle unsere auf oder in geringer Höhe über dem Erdboden aufgestellten Instrumente können uns nur über die Beschaffenheit und Bewegung der die Erdoberfläche direkt umgebenden Luftschicht Auskunft geben; über alle Vorgänge in den höheren Schichten bleiben wir im Dunkeln. Daß diese aber auf die Witterungsänderungen den größten Einfluß haben müssen, liegt auf der Hand. Vielleicht ist es möglich, daß durch regelmäßig und systematisch angestelltes Auflassen von Registrierballons die praktische Witterungskunde eine bedeutende Förderung erfährt.

Das Problem des lenkbaren Luftschiffes. Schon seit langer Zeit ist an dem Problem gearbeitet worden, den Luftballon durch Flügel oder Schrauben mittels Maschinenkraft zu bewegen und zu steuern; einige der interessanteren Versuche und Vorschläge sollen hier kurz besprochen werden.

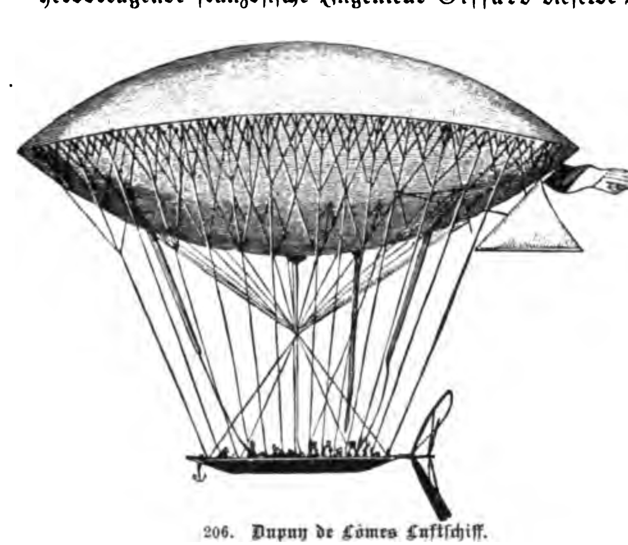
Die Windkraft selbst zur Steuerung eines Ballons auszunutzen, der ganz ohne Verbindung mit der Erde ist, ist, wie vorn ausgeführt wurde, aussichtslos. Früher glaubte man, Ballons in der Luft beliebig bewegen oder wenigstens steuern zu können mit Hilfe von Rudern; allein verschiedene Versuche, wie der im Jahre 1784 zu Dijon unternommene, ergaben das Vergebliche eines solchen Unternehmens. Im Jahre 1850 machte Petin in Paris den Vorschlag, ein Luftschiff für eine größere Anzahl von Personen zu bauen, in dem 4 Ballons von je 27 m Durchmesser ein Gerüst von 140 m Länge und 60 m Breite tragen sollten; in dem Rahmen sollten eine Anzahl schräge Flächen angebracht werden, die neben je einem Segel am vorderen und hinteren Ende zum Lenken dienen sollten. Ein praktischer Versuch mit einer solchen Konstruktion ist nicht zur Ausführung gekommen; aber es liegt auf der Hand, daß die ganze Einrichtung zum Steuern unbrauchbar war. Das ganze Luftschiff wäre ein Spiel des Windes gewesen, gleichviel wie die Segel und die schrägen Flächen gestellt worden wären.

Schon im Jahre 1784, also kurz nach der Erfindung des Luftballons schrieb der Amerikaner Hopkinson an Benjamin Franklin betreffs der Frage, Luftballons zu steuern: der Ballon selbst müsse zunächst anstatt kugelförmig länglich gemacht werden, um dem Winde weniger Fläche zu bieten; dann solle er am hinteren Ende mit einem großen, leichten Flügelrad mit schräg stehenden Flächen versehen werden, welches durch eine Kurbel in schnelle Drehung versetzt werden sollte. Dieser Vorschlag wurde damals nicht in weiteren Kreisen bekannt; er zeigt, daß Hopkinson schon ganz richtige Anschauungen über die Verwendung des Propellers für die Luftschiffahrt hatte, obwohl damals die Schraube



205. Giffards Dampfluftschiff.

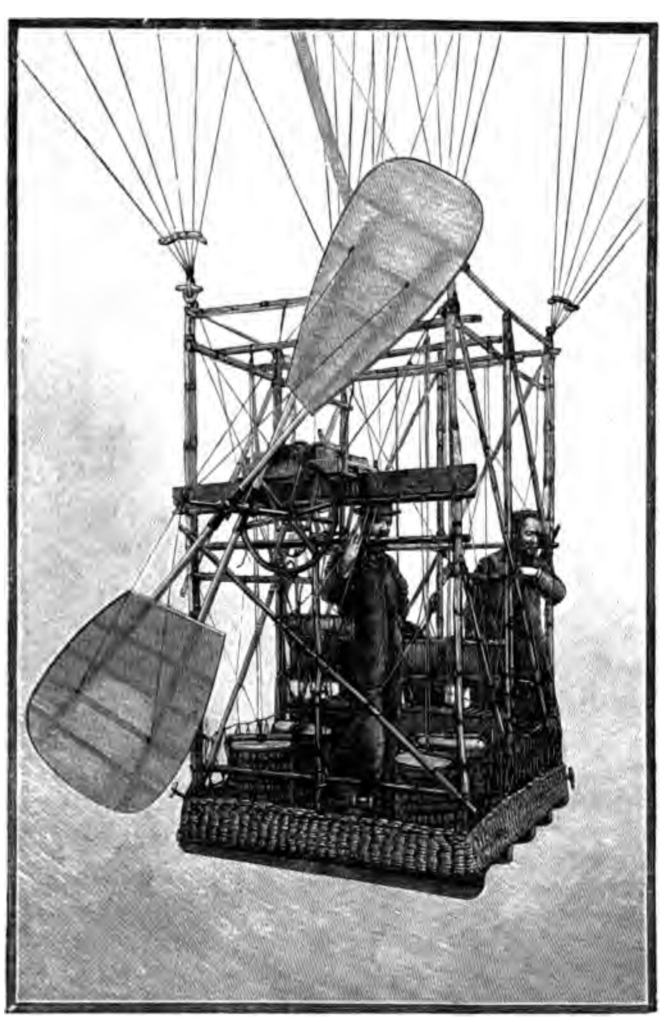
noch nicht für die Schiffsbewegung angewandt wurde. Erst 70 Jahre später führte der hervorragende französische Ingenieur Giffard dieselbe Idee aus, allerdings mit Dampfbetrieb. Er konstruierte einen länglichen, an beiden Enden spitz zulaufenden Ballon von 40 m Länge und 2100 cbm Inhalt, an welchem eine Plattform hing; diese trug einen Dampfkessel nebst Dampfmaschine, und letztere trieb eine große zweiflügelige Schraube mit horizontaler Welle, welche die Fortbewegung bewirken sollte. Für die Steuerung war am Hinterende des Ballons ein dreieckiges Steuersegel angebracht, welches vermittelst Schnüre von der Plattform aus um eine vertikale Stange gedreht werden konnte, also wie ein Steuerruder wirkte. Das Gesamtgewicht des Ballons mit



206. Dupuy de Lômes Luftschiff.

Ausrüstung betrug 1600 kg. Giffard stieg mit demselben 1852 zu Paris auf bis 1500 m Höhe; er konnte zwar nicht gegen den Wind aufkommen, aber es gelang ihm, den Ballon beträchtlich aus der Windrichtung zu steuern.

Zwanzig Jahre später wurden die Versuche wieder aufgenommen von seinem Landsmann Dupuy de Lôme. Sein Ballon war demjenigen Giffards sehr ähnlich; er war 39 m lang, wurde mit über 3000 cbm Wasserstoffgas gefüllt und sein Auftrieb betrug 4000 kg. Der Ballon trug ein großes Boot, in welchem ein Dutzend Personen an Kurbeln die Welle des Propellers drehten; letzterer bestand aus einem mit Seidentaffet überspannten Rahmen von 6 m Durchmesser. Dupuy de Lôme stieg 1872 mit seinem Luftschiff auf und erreichte eine Fortbewegung, welche auf 9 bis 10 km pro Stunde geschätzt wurde, und eine seitliche Richtungsänderung von 12°. Die Resultate waren nicht besser als die früheren von Giffard; die Anwendung von Menschenarbeit statt Maschinenkraft zur Bewegung der Schraube muß sogar als ein Rückschritt betrachtet werden. Der Grund dafür war die Gefährlichkeit, einen Dampfkessel in solcher Nähe der großen Menge brennbaren Gases zu heizen, denn durch Funken konnte letzteres einmal entzündet werden. Teilweise aus dieser Rücksicht hatte auch seinerzeit Giffard seine Versuche aufgegeben. Ähnliche Versuche machten in dieser und der folgenden Zeit, fast stets mit länglichen Ballons, der deutsche Ingenieur Hänlein — mit einem Gasmotor als Betriebsmaschine, für welche das Gas aus dem Ballon selbst entnommen wurde — Liotschak, Lippert, Baumgarten, Wolfert.

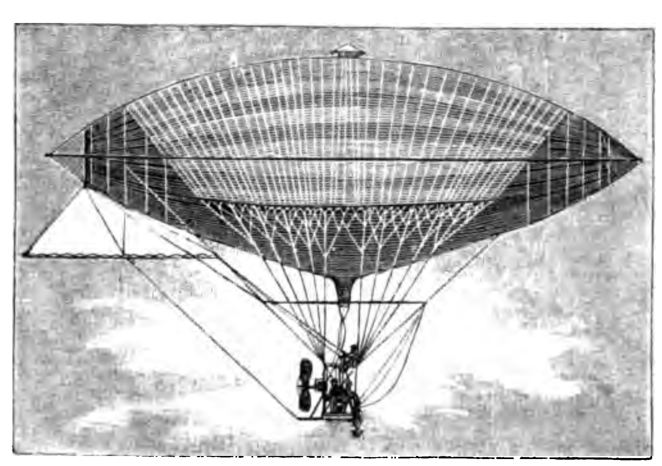


207. Gondel von Tissandiers elektrischem Luftschiff.

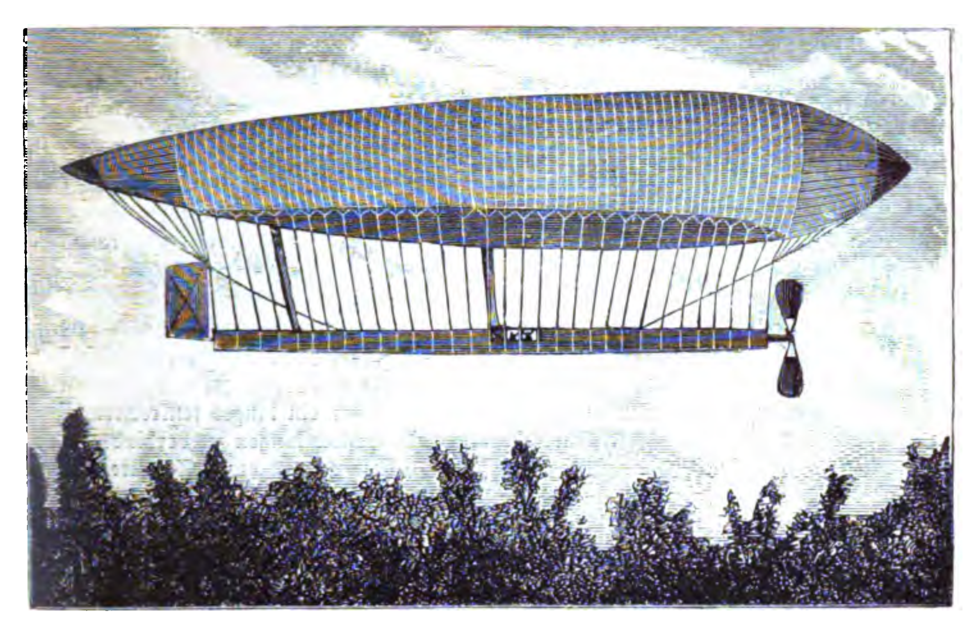
Anfang der achtziger Jahre begannen Versuche, die Elektrizität als bewegende Kraft für Luftschiffe zu verwenden. Der schon früher genannte Aeronaut Gaston Tissandier konstruierte auf Grund von Versuchen in kleinem Maßstabe einen Ballon von 28 m Länge und 9 m Durchmesser, mit 1060 cbm Inhalt; zur Füllung wurde Wasserstoff verwendet. Die Betriebskraft lieferte eine galvanische Batterie; durch einen Siemensschen Elektromotor wurde eine horizontale Propellerwelle gedreht, der Durchmesser des Propellers war annähernd 3 m. Die Maschinenkraft betrug etwas über eine Pferdestärke. Der erste

Aufstieg mit diesem Luftschiff erfolgte im Herbst 1883. In einer Höhe von 500 m wurde die Maschine in Thätigkeit gesetzt; die Windgeschwindigkeit betrug etwa 10 km pro Stunde (ca. 3 m pro Sekunde). Das Luftschiff vermochte sich eben gegen den Wind zu halten, doch nicht voranzukommen, während bei der Fahrt mit dem Winde die Geschwindigkeit sehr vergrößert wurde. Die Eigenbewegung des elektrischen Luftschiffes von Tissandier gegen den Wind betrug also etwa 3 m pro Sekunde oder 10 km pro Stunde.

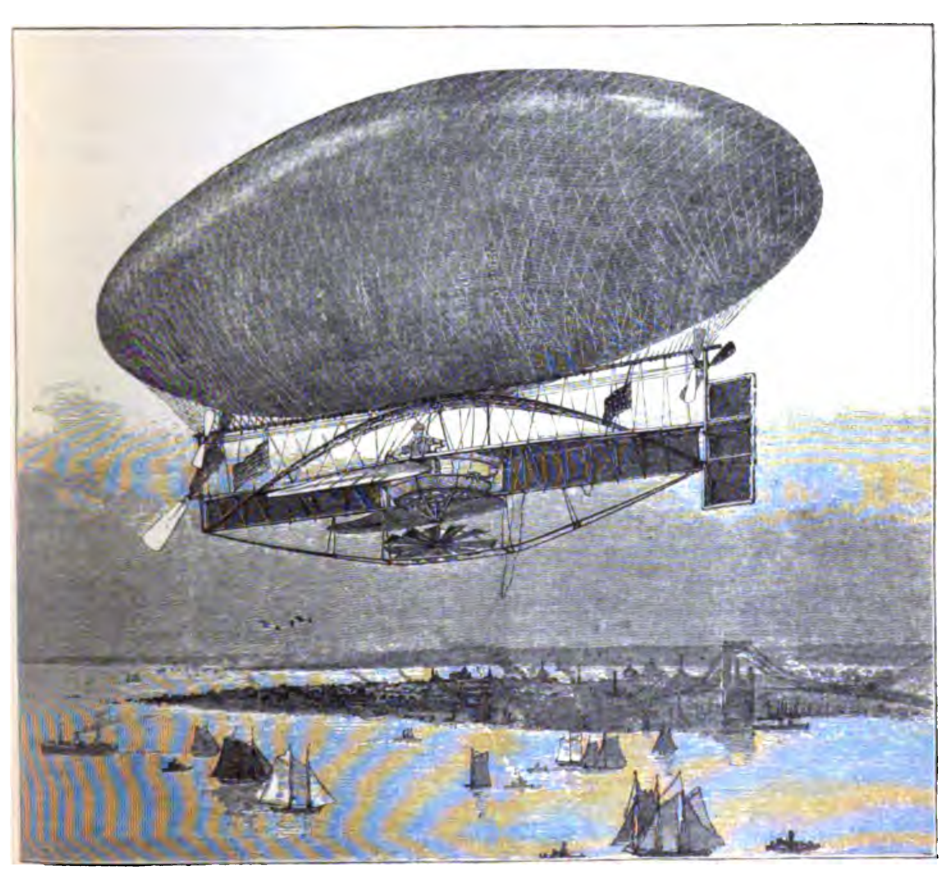
Bald nach dem Erfolge Tissandiers traten zwei französische Offiziere, Renard und Krebs zu Chalais-Meudon bei Paris, mit einem neuen lenkbaren Luftballon auf, welcher von den vielen Konstruktionen der neuesten Zeit die meiste Beachtung gefunden hat und gegen die Tissandiersche Konstruktion in der That einen bedeutenden Fortschritt darstellt. Beide hatten schon seit mehreren Jahren Studien und Experimente über die Lenkbarkeit von Luftschiffen angestellt, wozu ihnen von der Regierung der Betrag von 100 000 Frank zur Verfügung gestellt worden war. Die Arbeiten geschahen unter strenger Geheimhaltung, da die erhofften Erfolge in erster Linie für die französische Militär-Luftschiffahrt verwendet werden sollten. Durch diese pekuniäre Hilfe waren sie in der Lage, einen viel größeren Ballon zu bauen, als derjenige, mit dem Tissandier seinen Erfolg gehabt hatte, und einen Motor von der achtfachen Leistung zu beschaffen. Ihr Ballon „La France“ (s. Abb. 209) war 50 m lang, $8\frac{1}{2}$ m im größten Durchmesser mit 1870 cbm Inhalt; die Füllung geschah mit Wasserstoff, sein Auftrieb betrug 2200 kg. Die Kraft zum Betriebe der Schraube lieferte wie bei Tissandier eine galvanische Batterie; über dieselbe hat Major Renard nach langer Geheimhaltung vor einigen Jahren Angaben veröffentlicht. Im ganzen waren vierzig Elemente vorhanden, bestehend aus dünnen Glas- oder Ebonitgefäßen, die mit Chromsäure und Salzsäure gefüllt wurden. In dieselben tauchten die Elektroden; die positive war eine Röhre aus sehr dünnem platinierten Silberblech, die andere ein Zinkstift. Der hierdurch entwickelte Strom war außerordentlich kräftig im Vergleich zu dem Gewichte; er leistete in dem Elektromotor 9 Pferdestärken Arbeit. Auch das Verhältnis der Betriebskraft zum Querschnitt des Ballons war günstiger als bei Tissandier. Im August 1884 erfolgte der erste Aufstieg bei ruhigem Wetter. Das Luftschiff beschrieb eine elliptische Bahn von 8 km Länge und kehrte nach 23 Minuten auf seinen Ausgangspunkt zurück; die Fahrtgeschwindigkeit hatte also 6 m pro Sekunde betragen, oder über 20 km pro Stunde. Durch Vorwärts- und Rückwärtsmanövrieren wurde der Ballon genau auf derselben Stelle zu Boden gebracht, von wo er aufgestiegen war; es war das erste Mal, daß dies mit einem Luftschiff gelungen war. Später wurden noch mehrere Versuchsfahrten mit „La France“ gemacht, auch bei Wind von 5 m Geschwindigkeit pro Sekunde; auch hierbei kehrte der Ballon zu seiner Abgangsstelle zurück. Trotz dieser Erfolge erklärte Major Krebs selbst, daß er und sein Genosse noch sehr weit vom Ziele geblieben seien; die endgültige Lösung des Problems eines wirklich praktisch brauchbaren Luftschiffes sei auf diesem Wege nicht zu erreichen. Wenn auch die Batterie, der Ballon, kurz die ganze Ausrüstung bis an die Grenze der Möglichkeit erleichtert würde, so müßte man doch für eine Stunde Fahrt 1000 kg Elemente mitnehmen, um die etwa 20 Pferdestärken zu erzielen, welche einem Ballon wie „La France“ die als erforderlich zu



208. Tissandiers elektrisches Luftschiff.



209. Luftschiff von Renard und Krebs.



210. Campbells Luftschiff.

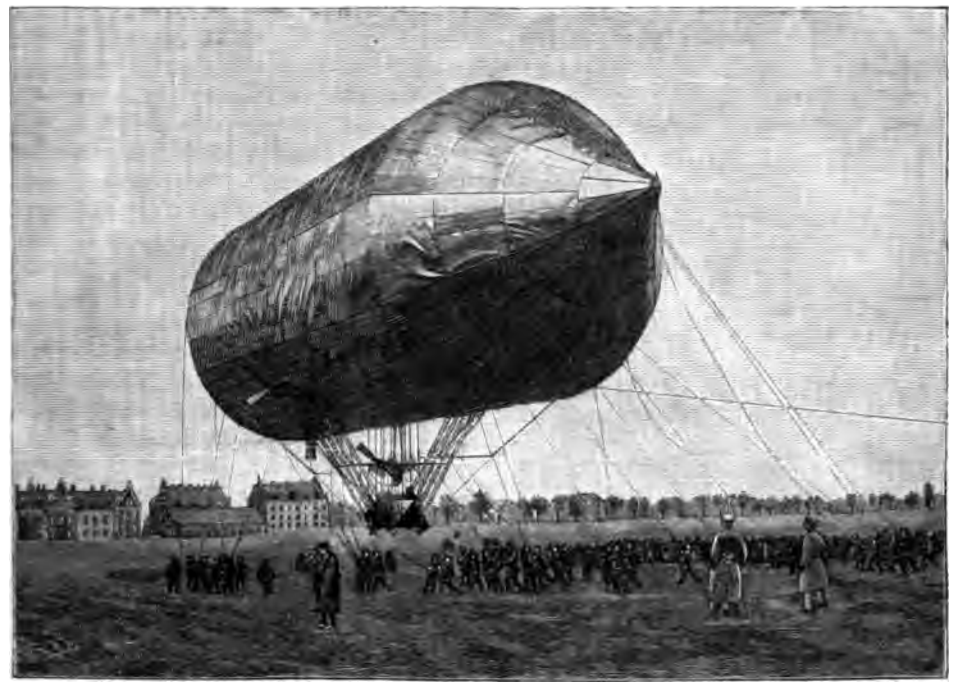
erachtende Minimalgeschwindigkeit von 10 m pro Sekunde oder 36 km stündlich erteilen könnten; nach einer Stunde wäre aber die Batterie arbeitsunfähig, und nur eine Stunde fahren zu können, hat für die praktische Verwendung natürlich keinen Wert.

Einen steuerbaren Ballon ohne Motor konstruierte P. C. Campbell zu Brooklyn (Nordamerika), welcher von verschiedenen Übelständen der früheren Konstruktionen frei sein und ein besseres Resultat geben sollte, als der Ballon von Tissandier oder Renard und Krebs. Abb. 210 stellt diesen Ballon dar. Es ist leicht ersichtlich, daß die Form des Ballons selbst ungünstiger ist, als bei den früheren, indem er vorn nicht spitz ist. Das Luftschiff sollte durch den Auftrieb nicht ganz gehoben werden, sondern hierzu war noch eine kleine Kraft nötig. Diese sollte durch schnelle Drehung des mitten unter der Gondel sichtbaren Rades mit schrägen Flügeln gewonnen werden; die Welle wurde durch eine Kurbel gedreht. Zur horizontalen Fortbewegung diente die zweiflügelige Schraube am vorderen Ende (links) des Ballons, deren Welle ebenfalls in der Gondel mit einer Kurbel endete. Unter dem Ballon war in Höhe der Gondel noch ein langes senkrechtes Segel gespannt, welches gleichsam als Kiel dienen sollte, um Schwankungen zu verhindern; am hinteren Ende (rechts) saß nun eine vertikale Stange, drehbar und durch Schnüre von der Gondel aus stellbar, das Steuerruder. Die beiden kleineren Flügelschrauben an beiden Enden sollten dazu dienen, den Ballon auf der Stelle zu drehen. Das war alles ganz hübsch ausgedacht, aber doch viel zu kompliziert, und der ganze Apparat sollte von einem Manne bedient werden; derselbe sollte die Kurbeln der beiden Hauptflügelräder drehen und das Steuer bedienen. Ein erster Aufstieg soll nach amerikanischen Berichten gelungen sein; das Luftschiff wäre hiernach zwei Stunden lang nach Belieben in der Luft nach allen Richtungen umhergefahren, wenn auch nur mit einer mittleren Geschwindigkeit von 8 km pro Stunde. Bei einer Auffahrt des Luftschiffers E. D. Hogan versagte der Mechanismus aber vollkommen: es wurde in großer Höhe vom Winde nach dem Meere fortgeführt, und man konnte von unten aus sehen, daß es den Anstrengungen Hogans weder gelang, den Ballon aus dem Winde zu steuern, noch mittels des unteren Rades zu senken. Hogan wurde nach dem Meere hinausgetrieben; es ist von ihm und dem Ballon nichts wieder gefunden worden.

Noch zwei weitere Menschenleben sind in allerletzter Zeit bei den Versuchen mit einem steuerbaren Ballon zu Grunde gegangen. Am 12. Juni 1897 fand auf dem Tempelhofer Felde bei Berlin die in der Fachwelt mit großen Hoffnungen erwartete Auffahrt des Ballons „Deutschland" statt; sie endete sehr schnell mit einer furchtbaren Katastrophe. Ein deutscher Gelehrter, Dr. Wölfert, hatte nach jahrelangen Versuchen einen mit motorisch betriebener Steuerung versehenen Ballon konstruiert, mit welchem er zuversichtlich das Ziel langen mühevollen Ringens erreicht zu haben glaubte. Der Ballon war in der Gestalt einer riesigen Zigarre ähnlich, 30 m lang und über 10 m hoch. Unter demselben hing die aus Bambusstäben konstruierte gallerieartige Gondel, welche einen Benzinmotor trug; derselbe stand nahe unter der unteren Seite des Ballons und trieb eine an der Vorderseite der Gondel angebrachte große Aluminiumschraube, die durch schnelle Rotation in bekannter Weise dem Ballon eine Eigenbewegung, auch gegen den Wind, geben sollte. Zur Steuerung diente ein 2 qm großes, am hinteren Ende der Gondel befestigtes Segel, das aus einem Bambusrahmen mit Leinwandüberzug bestand. Kurz nach dem Aufstieg wurde der Ballon durch eine fürchterliche Explosion zerstört und stürzte, in eine große, schauerliche Flammensäule verwandelt, zu Boden. Die beiden Insassen, der Erfinder Dr. Wölfert und sein Gehilfe, Mechaniker Knabe, fanden den Tod durch Verbrennen. Über die Ursache der Katastrophe nimmt man an, daß Dr. Wölfert in der Absicht, gleich beim ersten Aufstieg ein möglichst günstiges, schlagendes Resultat zu erzielen, bei dem Versuche, zur Auffahrtsstelle zurückzukehren, den Motor überanstrengt habe, wobei durch zu große Hitze oder Funkenbildung die zu nahe über dem Motor befindliche Ballonhülle in Brand geriet; oder auch, daß Dr. Wölfert in der Absicht, niederzusteigen, das Entleerungsventil geöffnet habe, ohne vorher den Motor zu löschen, und daß das ausströmende Gas sich an letzterem entzündet habe. Dr. Wölfert hatte sein ganzes Streben an die Durchführung seiner Ideen zur Lösung der Aufgabe eines lenkbaren Luftschiffes gesetzt. Als er endlich nach vielen Ent-

täuschungen das Ziel erreicht zu haben glaubte, fiel er und sein Gehilfe durch ein grausames Verhängnis der Wissenschaft zum Opfer.

Zum Schluß sei noch die am 3. November 1897 vom Luftschifferpark der preußischen Armee-Luftschifferabteilung zu Berlin aus stattgefundene Probefahrt des Aluminium-Luftschiffes von Schwarz erwähnt. Der Erfinder, David Schwarz, ein Österreicher, hatte seit Jahren an der Ausarbeitung und Vervollkommnung seines Werkes gearbeitet, und er wandte sich mit seiner Erfindung an die preußische Luftschifferabteilung, da die österreichische Heeresverwaltung nicht so vollkommene Einrichtungen besitzt, wie jene. Er fand daselbst Beachtung und Unterstützung und erhielt die Erlaubnis, seinen schwierigen und kostbaren Bau im preußischen Luftschifferpark selbst auszuführen. Leider war es Schwarz nicht beschieden, den Erfolg seiner Bemühungen zu sehen. Er starb vor Vollendung des Werkes; dieses wurde aber von seiner Witwe fortgeführt und vollendet. Schwarz hatte,



211. Lenkbares Aluminium-Luftschiff von Schwarz.

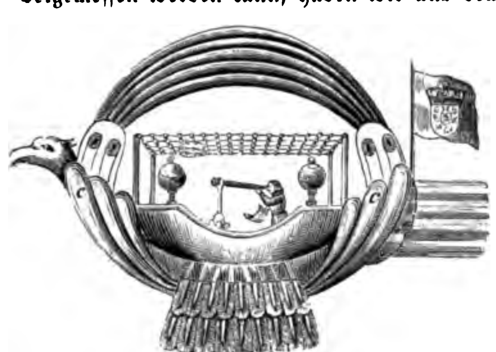
abweichend von den früheren Versuchen der Konstruktion eines lenkbaren Luftschiffes, für die Lösung dieses Problems als unerläßliche Vorbedingung die starre Verbindung der Gondel mit Bewegungsapparat und dem Ballon selbst aufgestellt und in seiner Konstruktion diese Bedingung erfüllt. Dieselbe bestand zu diesem Zweck ganz aus Aluminium. Auch der Ballon selbst, der die Form eines horizontalen, an beiden Enden kegelförmig zugespitzten Cylinders hatte, wurde aus einem Gerippe mit dünnem Aluminiumblechmantel hergestellt; mit demselben wurde die Gondel durch eine leichte starre Stabkonstruktion fest verbunden. Der Ballon wurde — was an sich eine bedeutende, vorher für unmöglich gehaltene technische Leistung darstellt — nach einer von Schwarz erdachten Methode mit Wasserstoffgas gefüllt und hatte hierdurch genügend Auftrieb, um außer seinem beträchtlichen Eigengewicht von 4000 kg noch die Gondel mit Ausrüstung, Ballast und dem Luftschiffer zu tragen. Letzterer war bei dem ersten Aufstieg ein junger Techniker, welcher an Stelle des verstorbenen Erfinders das Wagnis unternahm. Leider geschah kurz nach dem Aufstieg das Mißgeschick, daß der Treibriemen des Motors von der Antriebswelle abglitt, so daß die zur Bewegung und Steuerung dienenden Schrauben stille standen;

der Luftschiffer öffnete deshalb, um zu landen, das Gasausströmungsventil. Bei der Landung erlitt der Ballon mehrere Beschädigungen, welche vorläufig einen zweiten Aufstieg unmöglich machten. Der erste Versuch hat indessen trotz seines schließlichen Mißlingens keineswegs die auf die Erfindung gesetzten Erwartungen vernichtet; nach dem Urteil Sachverständiger scheint vielmehr das Schwarzsche Luftschiff thatsächlich die vom Erfinder versprochenen Leistungen erfüllen zu können: ist doch das Luftschiff durch seinen Bewegungsmechanismus entgegen einem Winde von 7 m Geschwindigkeit fortbewegt worden. Der Erfinder hatte nach seinen Berechnungen in Aussicht gestellt, daß es einer Windgeschwindigkeit von 10 m gewachsen sei. Jedenfalls sind die gewonnenen Resultate derart, daß sie nicht von weiteren Versuchen zurückschrecken, sondern vielmehr zu solchen anfeuern müssen.

Flugtechnik.

Es ist schon kurz erwähnt worden, daß in letzter Zeit die Flugtechniker die Erreichung des Zieles des freien Fliegens ganz ohne aerostatischen Auftrieb, nur auf mechanischem Wege zu erreichen hoffen.

Die ersten Nachrichten über angebliche Fliegeversuche, welchen jedoch kein Glauben beigemessen werden kann, haben wir aus dem Mittelalter. Roger Bacon behauptete, die Kunst des Fliegens zu verstehen, aber er hat diese Behauptung nicht durch Berichte über wirklich ausgeführte Luftflüge unterstützt. Gegen Ende des 16. Jahrhunderts haben verschiedentlich Gelehrte über die theoretische Möglichkeit des Fliegens geschrieben, so Borelli 1680, welcher nach mechanischen Prinzipien nachzuweisen suchte, daß es den Menschen niemals gelingen könne, sich durch ihre Muskelkraft mittels Flügel in die Höhe zu heben, welche Ansicht auch heute noch ziemlich allgemein herrscht. Im Anfang des 18. Jahrhunderts konstruierte Laurent ein Luftschiff, das durch menschliche Kraft fliegen sollte. Dasselbe war einem Vogel in der Form nachgebildet und hatte an beiden Seiten aus richtigen Vogelfedern gebildete Flügel, welche von einem Menschen bewegt werden sollten; Abb. 212 zeigt ein solches Kuriosum. Im Jahre 1786 erregte Besnier, ein junger Schlosser aus Sable in Frankreich, viel Aufsehen mit einer Fliegevorrichtung. Wie die Abb. 213 zeigt, bestand dieselbe aus zwei Stangen, die an beiden Enden breite Flügel hatten und auf je einer Schulter ruhten, wo sie um Zapfen beweglich waren. Die Flügel wurden mit beiden Händen und durch Schnüre oder Ketten mit den Füßen derart auf und ab bewegt, daß gleichzeitig der linke Vorderflügel und der rechte Hinterflügel sich hoben, während die anderen beiden sich senkten und umgekehrt. Besnier vermochte sich nach den Berichten mit diesem einfachen Apparat beim Abspringen von Höhen in schräger Richtung langsam niederzulassen, wobei er sogar Flüsse überschritten haben soll; er konnte sich jedoch nicht in der Luft halten oder steigen. Auch der schon erwähnte Luftschiffer Blanchard hat mehrere Flugmaschinen konstruiert, ohne daß es ihm indessen gelungen wäre, sich mit denselben wirklich in die Luft zu erheben.

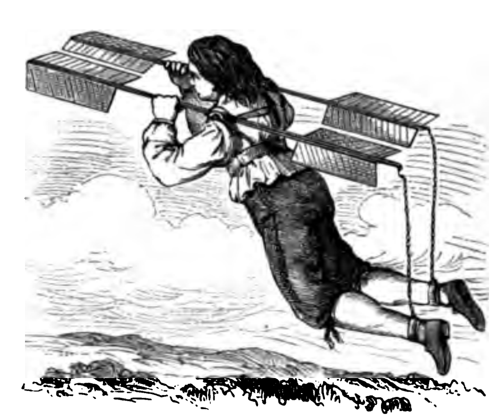


212. Laurents Luftschiff nach einer Zeichnung vom Jahre 1709.

Im Jahre 1874 trat ein holländischer Mechaniker de Groof mit einem von ihm erfundenen Flugapparat auf. Aus kleineren Versuchen gewann er die Überzeugung, daß er wenigstens von großen Höhen mit demselben ungefährdet langsam abwärts fliegen oder schweben könnte. Er wagte von einem Ballon aus einen Flug, stürzte aber sofort, nachdem er sich von dem Ballon losgelöst hatte, mit seinem Apparat zu Boden, wo er zerschmettert wurde.

Erst seit einigen Jahren sind die Versuche des freien dynamischen Fluges wieder aufgenommen worden und zwar in mehr zielbewußter Weise, auf wenigstens teilweise

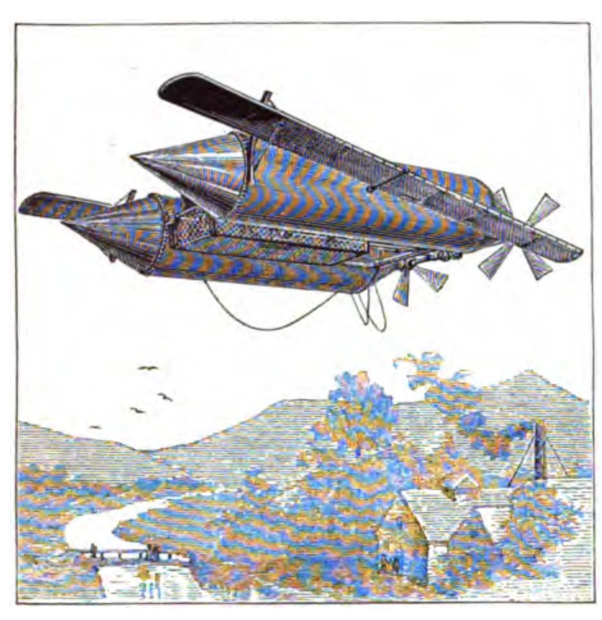
wissenschaftlich erforschter Grundlage und mit Benutzung aller Hilfsmittel der modernen Technik. Die Wissenschaft hat sich eingehender mit dem Fluge der Vögel befaßt; hierbei ist besonders der Schwebeflug näher beobachtet und untersucht worden, und man hat das interessante und höchst wichtige Resultat gefunden, daß viele Vögel sich gar nicht durch mechanische Arbeit mittels Flügelschlägen in die Höhe heben, sondern sich durch die eigentümliche Form und Stellung ihrer Flügel von dem Winde in die Höhe heben lassen. Hierauf ist eine Theorie des Vogelfluges ausgebildet worden, durch welche sich die mit den früheren Berechnungen in starkem Widerspruch stehenden thatsächlichen Erscheinungen in befriedigender Weise erklären lassen. Um durch mechanische Arbeitsleistung sein Gewicht in die Höhe zu heben und sich in der Luft schwebend zu erhalten, müßte ein Storch mit großer Geschwindigkeit ununterbrochen die Flügel schlagen und hierbei etwa eine Pferdestärke Arbeitsleistung entwickeln. Thatsächlich aber sehen wir häufig Störche fast ohne Flügelschläge und sichtlich ohne Anstrengung in der Luft schweben, kreisen, sogar höher steigen. Die Erklärung ist die, daß der Wind, ähnlich wie bei einem Papierdrachen, unter den gekrümmten schrägen Flächen der Flügel vorbeistreicht und dabei einen nach oben gerichteten Druck auf dieselben ausübt, durch welchen das Gewicht des Vogels gehalten oder je nach der Stellung noch gehoben wird. Durch die verschiedenartige Stellung der Flügel, also Änderung des Auftreffwinkels des Windes, sowie Flügelschläge wird die Wirkung des Windes reguliert und ergänzt. Manche Techniker behaupten zwar, daß es überhaupt ausgeschlossen sei, sich mit einem dynamischen Flugapparat in die Luft zu erheben; wie bei den Ballons, so sei es auch für Flugmaschinen nicht möglich, einen genügend leichten Motor für die erforderliche Kraftleistung zu konstruieren, und die Muskelkraft des Menschen sei zum freien Fliegen vollends ganz ungenügend. Dem entgegen aber steht die Beobachtung des Vogelfluges in der Natur; gerade die großen, schweren Vögel fliegen am besten, trotzdem das Verhältnis ihres Gewichtes zur Flügelfläche viel ungünstiger ist, als bei den kleineren Vögeln. Kleine Vögel können bei mittelstarkem Winde nur mit Anstrengung fliegen, trotz sehr schneller und lebhafter Flügelbewegung; ein Habicht dagegen schwebt gerade bei Wind sichtlich ohne Anstrengung und fast ohne Flügelschläge. Der kleine Vogel wendet also im Vergleich zu dem großen mehr Kraft an. Es kommt beim Fliegen und speziell beim Segelfluge darauf an, den Wind auszunutzen, und hierzu ist ein nicht zu kleines Gegengewicht zur Erhaltung des Gleichgewichtes, zum Steuern notwendig. Die großen Vögel verstehen es ausgezeichnet, auf diese Weise ohne Aufwendung großer Kraft sich vom Winde tragen und heben zu lassen, und der Mensch hat nur mit geeignet geformten und im Verhältnis zu seinem Gewichte entsprechend großen Flügeln dies nachzuahmen.



218. Der fliegende Bresnier.

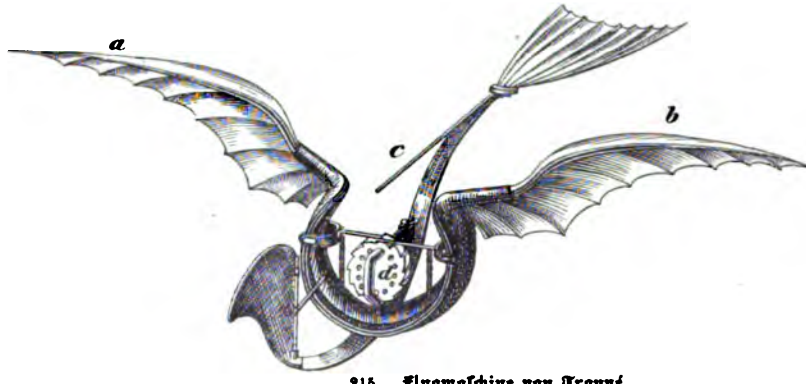
Aber in den praktischen Versuchen liegt die Schwierigkeit. Man kann nur frei in der Luft fliegen lernen; um aber in der Luft frei schweben zu können, ohne sofort zu Boden zu stürzen, soll man eben fliegen können. Man weiß keinen Anfang zu machen. Schwimmen lernen kann man, indem man zunächst an einer Leine gehalten auf einer Stelle im Wasser die Bewegungen übt; für das Fliegen ist aber die Bewegung selbst die Vorbedingung. Nun ist es bekannt, daß gerade die größeren Vögel, also die besseren Flieger, vom Boden aus sich nicht direkt in die Luft zu erheben vermögen; man kann gute, größere Flieger in oben offenen Räumen gefangen halten, welche in einem engen Kreise mit einer nur wenige Meter hohen Mauer umgeben sind, denn sie vermögen nicht, über diese fortzufliegen, da sie keinen Raum für einen Anlauf haben. Sie müssen erst durch

Laufen auf dem Boden eine gewisse horizontale Geschwindigkeit erlangen, um einen Luftdruck gegen ihre unteren konkaven Flügelflächen zu erzeugen, welcher sie in die Höhe hebt; sie schaffen sich also künstlich Wind, und um einen kräftigeren Luftdruck zu erhalten, laufen sie gegen den Wind. Es ist auf diese Weise möglich, durch zunächst horizontale Bewegung den Flug mit einem Flugmechanismus einzuleiten, und die meisten neueren Flugapparate sind nach diesem Prinzip konstruiert. Aber die Flugapparate dürfen natürlich nicht allein auf die hebende Kraft des Windes angewiesen sein; ebenso wie die Vögel auch durch eigene Kraft mittels Flügelschlägen diese Wirkung ergänzen und regulieren, den Flug steuern können, so muß auch ein brauchbarer Flugapparat durch eigene Kraft Bewegung erzeugen können. Über die Art, wie dies am besten zu erreichen ist, gehen die Ansichten noch auseinander. Im folgenden sollen einige neuere Flugmaschinen besprochen werden.



214. Luftschiff von Bechtel.

Ein Zwischending zwischen lenkbarem Ballon und rein dynamischer Flugmaschine ist das in Abb. 214 dargestellte Luftschiff von Bechtel in Udall, Kansas (Nordamerika). Dasselbe hat zwei große, aus möglichst leichtem Material hergestellte, lange, vorn und hinten kegelförmig zugespitzte Cylinder, die mit leichtem Gase angefüllt sind; sie sind mit einer zwischen ihnen liegenden leichten Plattform aus Drahtgewebe verbunden, welche einen elektrischen oder anderen Motor trägt. Derselbe treibt durch eine nach hinten hinausgehende Welle zwei am hinteren Ende sitzende Propellerflügel. An den äußeren Seiten der Cylinder sind zwei um horizontale Zapfen drehbare lange Flügel befestigt, die in verschiedene Neigung zur Horizontalen gestellt werden können. Die beiden Cylinder sollen so viel Auftrieb haben, daß die Schwere des ganzen Apparates nicht ganz aufgehoben wird, derselbe also nicht von selbst aufsteigt. Durch den Motor soll die Maschine mittels Propeller vorwärts getrieben werden; hierbei drücken die seitlichen beiden Flügel je nach ihrer Neigung mehr oder weniger gegen die Luft, und ebenso wie bei dem Segelfluge der Vögel resultiert hieraus eine nach oben gerichtete Kraft, die das Luftschiff in die Höhe hebt. Durch die Stellung der seitlichen Flügel soll also das Steigen oder Fallen reguliert

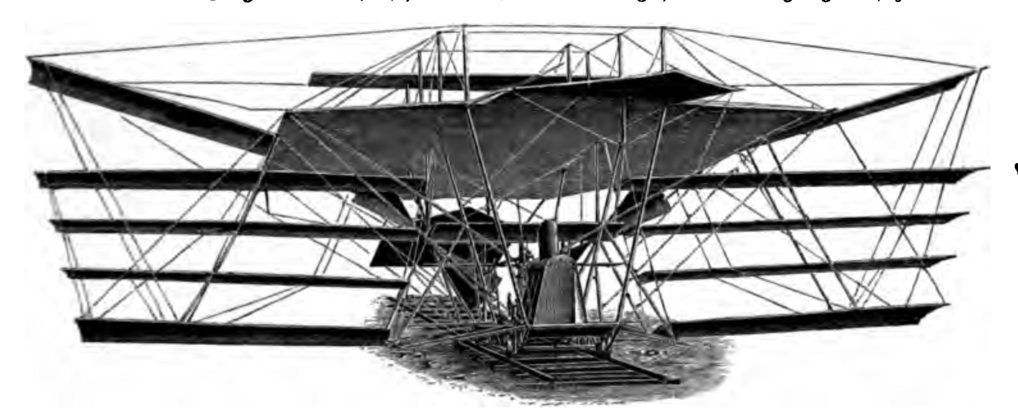


215. Flugmaschine von Trouvé.

werden, während das Steuern dadurch geschieht, daß der eine oder andere Propeller ausgeschaltet wird. Es ist nicht bekannt geworden, ob mit diesem Flugapparat wirklich Luftflüge geglückt sind; abgesehen von der Schwierigkeit, so große Behälter genügend leicht und doch stark genug herzustellen, daß eine Füllung mit Wasserstoff einen Auftrieb gleich dem Gewichte der ganzen Maschine bewirkt, ist auch hier, wie bei lenkbaren Luftschiffen, die Hauptsache die Beschaffung eines sehr leichten und doch genügend kräftigen Motors, um zwei große Schrauben in sehr schnelle Rotation zu versetzen.

Ganz dem Prinzip des Vogelfluges nachgebildet ist die Flugmaschine von Trouvé, welche einem fliegenden sagenhaften Drachen gleicht, wie die Abb. 215 zeigt. Der Erfinder war hauptsächlich bedacht, eine große Kraftwirkung bei möglichst geringem Gewichte zu erzielen, und hat zu diesem Zweck einen neuen, höchst eigentümlichen Motor konstruiert. Der ganze Apparat hat keinen Cylinder, keine Wellen, Pleuelstangen, Zapfenlager oder Übertragungen; die Kraft bewirkt direkt in der beabsichtigten Weise die Bewegung der beiden großen, drachenförmig gewölbten Flügel a und b. Diese sind nämlich an den beiden Schenkeln eines hohlen, hufeisenförmig gebogenen elastischen Rohres befestigt, das einen elliptischen Querschnitt hat. Wir haben schon in einem früheren Kapitel bei den Metallmanometern gesehen, daß ein solches Rohr seine Form verändert, die Schenkel auseinanderdehnt oder zusammenzieht, wenn die Luft in demselben verdichtet oder verdünnt wird. Das Rohr ist also mit einem großen Bourdonschen Manometer zu vergleichen. Durch schnell wechselnde, starke Druckveränderungen werden die Schenkel und damit die Flügel in ebenso schnelle auf- und niedergehende Bewegung versetzt. Die


216. Hargraves Flugmaschine.


217. Maxims Flugmaschine.

Druckänderungen werden dadurch bewirkt, daß in dem U-Rohre in gewissen Zwischenräumen kleine Mengen Knallgas zur Explosion gebracht, und alsbald darauf die Explosionsgase ausgelassen werden; der Wasserstoff hierzu soll in einem Behälter komprimiert mitgenommen werden. Die Flügel sind, wie bei den Vögeln, so geformt, daß nur beim Niederschlagen ein Druck auf die Luft ausgeübt und hierdurch der Apparat gehoben wird; durch den Hebel c soll mittels der Schwanzflosse die Steuerung bewirkt werden. Bei dem Modell, welches der französischen Akademie der Wissenschaften vorgelegt worden ist und das wirklich durch die Luft fliegt, sind die für größere Ausführungen bestimmten Knallgasexplosionen durch die kleine Revolverkammer D ersetzt, in welcher

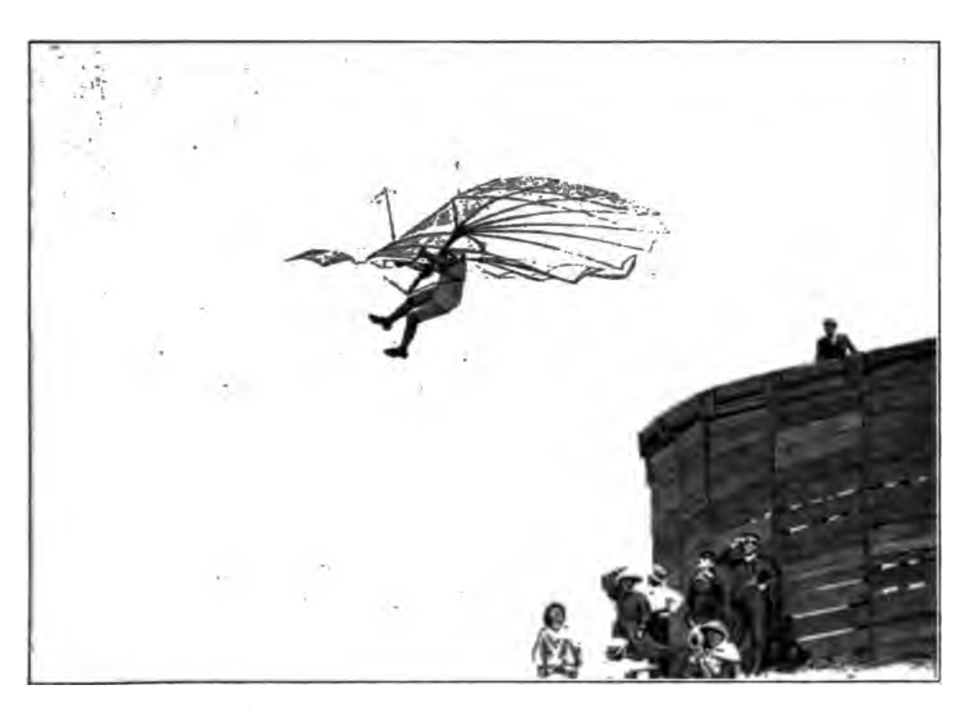
nacheinander 12 Patronen entzündet werden, deren Gase in das gebogene Rohr geleitet werden. Das Modell fliegt bei einem Gewicht von $3^1/_2$ kg durch das Abbrennen der 12 Patronen etwa 75 m weit in horizontaler Richtung und sinkt nach der letzten Explosion und dem letzten Flügelschlage langsam zur Erde nieder.

Seit mehreren Jahren hat Lawrence Hargrave zu Sydney (Australien) Flugmaschinen konstruiert, welche sich durch Leichtigkeit, verbunden mit sinnreicher Erfindung und Anordnung der Teile auszeichnen. Seine verschiedenen Erfindungen zeigen immer Fortschritte; eines seiner neueren Modelle stellt Abb. 216 dar. Der eigentliche Flugapparat besteht aus einem Flügelpaar und einer großen hinteren Segelfläche. Die Flügel sind nur mit ihrer vorderen Kante an dem Bewegungsmechanismus befestigt, welcher sie in auf- und niedergehende Bewegung versetzt. Hierbei stellen sich die Flügelflächen, da sie nicht ganz steif sind, durch Federung etwas schräg, wodurch die Luft nicht nur nach unten verdichtet, sondern auch nach hinten gedrückt wird, so daß eine vorwärtstreibende Kraft resultiert. Durch die Vorwärtsbewegung erlangt, wie schon früher dargelegt, die nach hinten geneigte Segelfläche ihre Tragkraft. Die Bewegung wird durch einen Druckluftmotor bewirkt; die komprimierte Luft ist in einem Stahlcylinder enthalten, der zwischen den Flügeln und unter der Segelfläche liegt. Die Maschine soll bei Versuchen 150 m weit geflogen sein; es ist aber dem Erfinder bis jetzt noch nicht gelungen, sie in großer Ausführung praktisch brauchbar zu machen.

Der durch seine Schnellfeuerkanonen allgemein bekannt gewordene englische Erfinder Hiram S. Maxim hat sich seit 1890 mit der Erfindung eines Flugapparates beschäftigt, und zwar hat er gleich eine Dampfflugmaschine in großem Maßstabe konstruiert. Im Juli 1894 hat er dieselbe zuerst vorgeführt, und zum erstenmal hat sich wirklich eine große Maschine mit Dampfkessel, Dampfmaschine und drei Personen nur durch mechanische Kraft, ohne Ballon, frei vom Boden erhoben. Allerdings verunglückte die Maschine, nachdem sie sich eben erst erhoben hatte, aber dies soll durch zufällige Umstände und nicht durch Fehler der Maschine selbst verursacht worden sein. Die Maschine hat ein Gestell aus Stahlrohren und Stahldraht; im unteren Teile trägt dasselbe eine Plattform, auf welcher ein Röhrendampfkessel und Behälter für Wasser und Gasolin montiert sind und außerdem die Mannschaft Platz nimmt. 3 m höher sind zwei Dampfmaschinen untergebracht, welche je eine Propellerschraube von über 5 m Durchmesser mit horizontaler Welle treiben. Darüber befindet sich die große Hauptsegelfläche; zu beiden Seiten strecken sich fünf Paar kleinere Flügel aus, von denen die mittleren drei Paar nicht immer gebraucht werden sollen. Die äußere Breite beträgt 38 m, die Länge 31 m, das Gesamtgewicht, mit Ausrüstung und Mannschaft, 3600 kg. Wenn alle Flügel gesetzt sind, beträgt die gesamte Segelfläche 490 qm. Vorn und hinten an der Hauptsegelfläche befinden sich Steuersegel, welche durch Drähte und ein Steuerrad von der Plattform aus gehoben und gesenkt werden können; durch ihre Stellung soll die Maschine während der Fahrt gehoben oder gesenkt oder in gleicher Höhe gehalten werden. Der Dampfkessel wird in höchst sinnreicher Weise mit Gasolin oder Naphtha geheizt; die beiden Maschinen übertragen auf die Schrauben 363 Pferdestärken, im Vergleich zu dem Gesamtgewichte eine außerordentliche Leistung. Hierbei machen die Schrauben 375 Umdrehungen pro Minute. Von der ganzen Kraft gehen 150 Pferdestärken verloren durch den Slip (s. unter Schraubendampfer), 133 werden verbraucht für den aktiven Auftrieb durch die Segelflächen und 80 zum Forttreiben der ganzen Flugmaschine durch die Luft. Bei einer horizontalen Geschwindigkeit von 58 km pro Stunde oder 16 m pro Sekunde wird durch den Auftrieb das Gewicht der ganzen Maschine mit Ausrüstung gerade aufgehoben, und bei 64 km Geschwindigkeit beträgt der Auftrieb 4500 kg. Zur Inbetriebsetzung wird die Maschine auf ein Geleise gesetzt, auf welchem sie auf Rädern durch die Rotation der beiden Propeller fortgetrieben wird, bis die erforderliche Geschwindigkeit erreicht ist und der Auftrieb wirksam wird. Wie der Erfinder Maxim mitteilt, hat er nach der Zerstörung seiner ersten Maschine trotz der Kostspieligkeit die Sache nicht aufgegeben; er hat vielmehr durch diesen Versuch die Überzeugung gewonnen, daß die Maschine frei fliegen könne und in der That ein Stück weit frei geschwebt hat. Er will einen neuen Apparat



218. Lilienthals Segelflugapparat. (Zu S. 190 ff.)
Nach dem Leben aufgenommen von Ottomar Anschütz.



219. Lilienthal mit seinem Apparat durch die Luft schwebend. (Zu S. 190 ff.)
Nach dem Leben aufgenommen von Ottomar Anschütz.

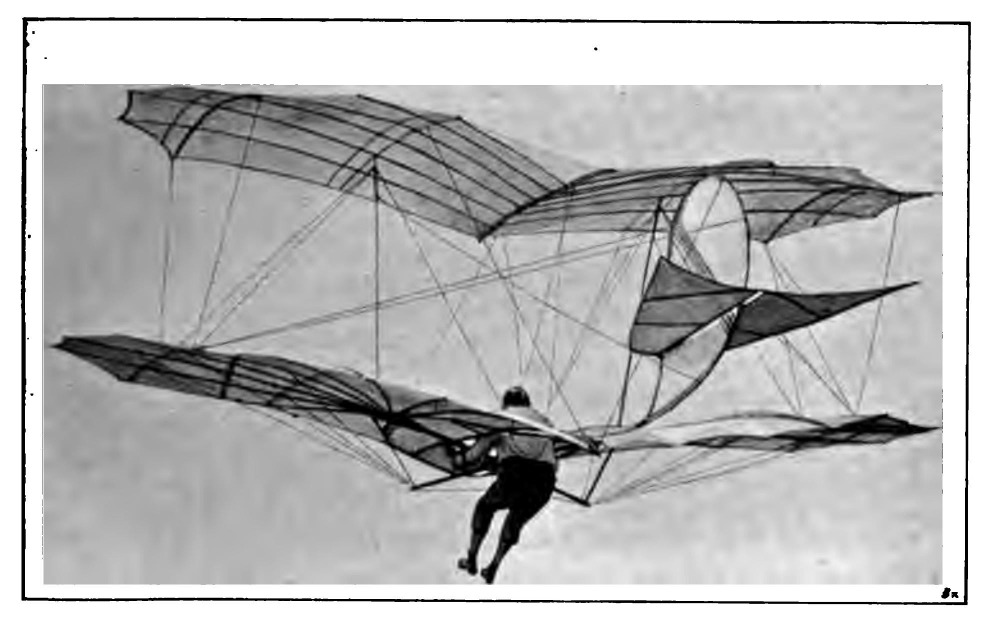
bauen, an dem er noch manche Verbesserungen, besonders an der Dampfmaschine, anbringen will.

Professor Wellner an der technischen Hochschule zu Brünn hat im Jahre 1894 auf Grund langjähriger Studien und Beobachtungen des Vogelfluges durch Versuche die richtige Form der Flügel festzustellen gesucht und nach den Ergebnissen dieser Arbeiten eine Segelrad-Flugmaschine konstruiert, welche auch in wissenschaftlichen Kreisen Deutschlands und Österreichs viel Beachtung gefunden hat. In einer länglichen Gondel befinden sich die Räume für den Motor, das Heizmaterial und die Luftschiffer. Der Flugmechanismus besteht aus zwei Rädern mit einer Anzahl schräg gestellten, gekrümmten Flügeln. Dieselben bewirken durch ihre Rotation und den hierbei ausgeübten Druck auf die Luft vermöge ihrer eigentümlichen Form und ihrer Neigung zugleich die Hebung und die horizontale Fortbewegung des Apparates; die Neigung der Flächen ist durch einen Steuerungsmechanismus verstellbar. Zunächst hat der Erfinder eine Maschine konstruiert für 4—8 Personen, mit drei Segelrädern von 6,4 m Durchmesser zu jeder Seite des Schiffes. Die ganze Flugmaschine ist 20 m lang; der Motor leistet 80 Pferdestärken und dreht die Segelräder mit 135 Umdrehungen pro Minute. Hierdurch soll eine Tragfähigkeit von 6400 kg erzielt werden. Die Maschine soll, wenn die Räder die richtige Umdrehungsgeschwindigkeit erlangt haben, von der Stelle auffsteigen, also ohne vorher auf dem Boden sich horizontal fortzubewegen. Das Luftschiff soll sich nicht hoch in die Lüfte erheben, sondern nur etwa 20—40 m hoch über dem Boden fliegen; der Erfinder denkt eine Geschwindigkeit gleich der doppelten bis dreifachen der Eilzüge mit demselben zu erreichen. Es ist zuerst eine kleine Segelrad-Flugmaschine erbaut worden, mit der der Erfinder in Wien Versuche gemacht hat, welche ihn befriedigten, indem seine Voraussetzungen sich bestätigt fanden. Professor Wellner hofft zuversichtlich, daß mit seinem System die Lösung der Frage des freien dynamischen Fluges in nicht zu ferner Zeit praktisch gelingen werde.

Inzwischen ist in letzter Zeit, im Sommer 1896, von Amerika die Nachricht herüber gekommen, daß Professor Langley zu Washington das Problem der Flugmaschine praktisch gelöst habe. Nach den Berichten angesehener Männer der Wissenschaft, wie des Professors Graham Bell, des Erfinders des Telephons, welcher den Versuchen beiwohnte, sind Probeflüge über eine Bucht des Potomacflusses bei Washington veranstaltet worden, welche vortrefflich verlaufen sind und die Anwesenden in Erstaunen versetzten. Graham Bell bezeichnet in einem Bericht den 6. Mai 1896, an welchem die Versuche stattfanden, als einen historischen Tag für die Flugtechnik, da an demselben bewiesen worden sei, daß eine Maschine mit Dampfkraft sich frei gegen den Wind erheben und beträchtliche Flüge ausführen könne. Die neue Flugmaschine, Aerodrom genannt, gleicht äußerlich einem riesigen Vogel; die Flügelweite des zunächst nur als Modell ausgeführten Apparates beträgt 4 m, und der Betrieb geschieht durch eine Dampfmaschine von einer Pferdestärke Leistung. Der Apparat wurde von einem Schiffe aus abgelassen; er beschrieb in der Luft Spiralflüge von 100 m Durchmesser und erhob sich hierbei langsam bis 25 m hoch. Nachdem die nur für einen kurzen Flug berechnete Dampfmaschine während der Fahrt zum Stillstand gekommen war, senkte sich der Apparat langsam nieder, ohne Schaden zu nehmen. Der Flug war sehr gleichmäßig und ruhig. Bei einer zweiten Fahrt war die Steuerung anders eingestellt worden; der Apparat flog seitlich auf eine vorspringende Landecke zu, erhob sich 8—10 m über die Wipfel eines Waldes und senkte sich nach einer Flugbahn von etwa 900 m, die er in 31 Sekunden zurückgelegt hatte, nieder. Die mittlere Geschwindigkeit des Fluges betrug etwa 10 m pro Sekunde oder 32—40 km pro Stunde. Wenn nun auch nicht an diese Versuche die übertriebene Hoffnung geknüpft werden darf, daß wir in kurzer Zeit mit Dampfflugapparaten durch die Luft reisen werden, wie jetzt mit der Eisenbahn, so ist doch zweifellos die Erfindung ein bedeutsamer Fortschritt; sie beweist jedenfalls die Möglichkeit des freien dynamischen Fluges und hat der weiteren Ausbildung der Flugtechnik einen neuen Sporn gegeben.

Zum Schluß seien noch die Segelflugversuche des Ingenieurs O. Lilienthal zu Berlin besprochen, welche in der ganzen Welt bekannt geworden sind und in hohem Maße

die Aufmerksamkeit aller erregt haben, die sich theoretisch oder praktisch mit der Flugfrage beschäftigen. Lilienthal war zweifellos von allen Flugtechnikern praktisch am weitesten auf dem Gebiete der Flugfrage vorgeschritten. Ob seine Theorie der Lösung dieser Frage die richtige ist, mag dahingestellt sein; jedenfalls hat er die praktischen Fliege- und Schwebeversuche am weitesten gefördert. Er erblickte die Lösung der Flugfrage in erster Linie in dem Studium des Vogelfluges, speziell des Segelfluges der größeren Vögel, und in den Versuchen, ihn nachzuahmen. Er ging davon aus, daß man nicht gleich daran gehen dürfe, große Flugmaschinen mit Kessel und Dampfmaschine, wie die Maximsche, zu konstruieren, daß sich das Flugproblem nicht mit einem Schlage durch eine glückliche Erfindung lösen lasse, daß vielmehr nur die allmähliche Entwickelung, beruhend auf dem Studium und der Erkenntnis der Gesetze des Luftwiderstandes sowie der Wirkung des Windes auf schwebende Körper und Flächen, schließlich zu Erfolgen führen werde. In der Luft schwebend, müsse der Mensch sich praktische Kenntnisse in der Fliegepraxis erwerben, indem beim wirklichen



220. Lilienthals Segelflugapparat mit Doppelflügeln.
Nach dem Leben aufgenommen von Ottomar Anschütz.

Fliegen viele eigentümliche Erscheinungen, besonders durch die Unregelmäßigkeiten des Windes auftreten, die sich der Berechnung, überhaupt der vorherigen theoretischen Behandlung ganz entziehen.

Lilienthal hatte seit etwa sechs Jahren mit Erfolg eine Methode auszubilden versucht, ohne Gefahr praktische Flugübungen zu machen. Er hat Segelflugapparate konstruiert, mit denen er von erhöhten Punkten aus gegen den Wind auf ziemliche Längen schräg abwärts durch die Luft schwebte, bis er ohne Anprall den Boden wieder erreichte. Solcher Segelflüge hat Lilienthal sehr viele ausgeführt, anfangs mit kleinen, später mit größeren Segelflügeln, welche 14 qm Segelfläche haben und von Spitze zu Spitze 7 m messen. Die Abb. 218 zeigt nach einer photographischen Aufnahme Lilienthal mit seinem Flugapparat; er läuft mit ausgebreiteten Flügeln den Abhang eines Hügels hinab und zwar, wenn ein schwacher oder mäßiger Wind herrscht, gegen die Richtung desselben. Bei starkem Winde ist das Unternehmen noch zu gefährlich, da ein unerwarteter Windstoß, der die Flügel von oben trifft, den Menschen samt dem Apparat mit Heftigkeit nach unten wirft und, ehe es dem Flieger gelingt, durch Änderung der Schwerpunktslage seines Körpers die Flügel so zu richten, daß der Wind wieder unter dieselben kommt und den Apparat

hebt, auf den Boden schmettert. Abb. 219 zeigt nach einer photographischen Momentaufnahme Lilienthal mit seinem Apparat in der Luft schwebend in einem Augenblick, wo er von einem stärkeren Winde aus der abwärts geneigten Flugbahn höher in die Luft gehoben wurde. Der verwendete Flugapparat hatte, wie ersichtlich, noch einen hinteren Steuerflügel. In letzter Zeit hatte Lilienthal seinen Apparat wesentlich verändert, indem er ein Doppelflügelpaar konstruierte, wodurch er bei kleineren Flügeln doch eine größere Tragfläche erhielt (s. Abb. 220); die Flügel dieses Apparates haben zusammen 18 qm Fläche bei $5\frac{1}{2}$ m Spannweite. Mit demselben hat der Flugkünstler Versuche bei 10 m Windgeschwindigkeit gemacht. Hierbei hob der Wind ihn ohne Anlauf von der Spitze des Hügels ab, und er konnte fast horizontale Flüge machen; zuweilen war die Flugbahn sogar stark in die Höhe gerichtet, so daß er sich über den Abfliegepunkt erhob.

Lilienthal hatte mehrfach darauf aufmerksam gemacht, daß derartige Segelflugversuche nur mit großer Vorsicht gemacht werden dürften, daß man sich nur allmählich durch viele Übung die erforderliche Sicherheit erwerben könne, um nicht in der Luft ein willenloses Spielzeug des Windes zu werden, sondern durch geschickte Verlegung des Schwerpunktes und Änderung der Flügelstellung sich von dem Winde tragen zu lassen und das Gleichgewicht zu halten. Trotzdem er also die Gefahr wohl erkannte und nur langsam und schrittweise von den kleineren und einfacheren zu schwierigeren, größeren Versuchen überging, ist er doch ein Opfer derselben geworden. Schon vor einigen Jahren war ihm in der Nähe Berlins ein Flugversuch mißglückt, indem er statt langsam einen Hügel hinabzugleiten, mit großer Geschwindigkeit hinabsauste; er wurde zum Glück in einen kleinen Sumpf am Fuße des Hügels geschleudert, welcher so weich war, daß er mit zwar erheblichen, jedoch nicht gefährlichen Verletzungen davonkam. Im Sommer 1896 aber stürzte er bei einem Flugversuche in der Nähe von Rhinow bei Berlin am 10. August aus großer Höhe zur Erde, so daß er mit tödlichen Verletzungen auf dem Platze liegen blieb und kurze Zeit darauf an einem Bruch der Wirbelsäule starb. Noch wenige Wochen vorher hatte Lilienthal in der Berliner Gewerbe-Ausstellung in einem Vortrage über seine Erfindung und seine Versuche einen zusammenfassenden Bericht über die Resultate derselben gegeben; er sprach hierbei die zuversichtliche Hoffnung aus, daß die von ihm geschaffenen Anfänge einer Fliegekunst sich zu immer größerer Vollkommenheit ausbilden ließen. Aus seinen Ausführungen schien hervorzugehen, daß er gerade im Begriff sei, durch eine neue Erfindung einen bedeutsamen Fortschritt zu machen; vielleicht ist es die Erprobung dieses neuen, zu kühnen Erfindungsgedankens gewesen, die ihm den Tod gebracht hat.

Lilienthal hatte bei seinen Versuchen keine Flügelschläge gemacht, sondern sich nur bemüht, das Gleichgewicht zu halten und nicht vom Winde herumgedreht zu werden; aber er hatte die Überzeugung gewonnen, daß es bei längerer Übung schließlich gelingen müsse, durch Flügelschläge beliebig höher zu steigen und durch seitliche Wendung eine kreisende, steigende Bahn zu beschreiben, wie die großen Segelvögel. Der Schritt von den bisherigen Erfolgen und der Erkenntnis der Möglichkeit bis zum ersten wirklich ausgeführten beliebigen freien Fluge ist allerdings nicht leicht, aber der Weg zur Erreichung dieses Zieles ist gezeigt, und die Hoffnung erscheint nicht mehr so utopisch, daß in nicht zu ferner Zeit der Mensch für seine Bewegung nicht mehr auf die Erde und allenfalls die Oberfläche des Wassers beschränkt ist, sondern auch frei durch die Lüfte zu fliegen vermag.

II.

Die physikalischen Erscheinungen und Kräfte, ihre Erkenntnis und Verwertung im praktischen Leben

von

Professor Dr. L. Grunmach

❦

Die physikalischen Erscheinungen und Kräfte,

ihre Erkenntnis und Verwertung im praktischen Leben.

Maß und Messen.

Einleitung. Die drei Grundbegriffe der Maßbestimmung. Einheiten der Länge, der Masse und der Zeit. — Meßapparate.

In dem Haushalt der Natur besteht scheinbar ohne Wahl oder Absichtlichkeit eine unabänderliche Ordnung, welche man bewundernd anerkennt; eine eherne Gesetzmäßigkeit regelt das Ganze, und nichts fällt aus diesem Gesetze heraus. Das geringste Stäubchen empfängt und gibt ab Kraft und Stoff in ununterbrochenem Wechsel; von allen Seiten wirken Kräfte auf dasselbe, von allen Seiten hat es fortwährend Zuflüsse, aber ebenso äußert es sich auch nach allen Richtungen hin fortwährend, sei es, daß es durch seine eigene Bewegung die Bewegung anderer Stoffteilchen beeinflußt, oder daß es Wärme abgibt, oder Licht oder Elektrizität, oder durch chemische Zersetzung Verluste an der eigenen Masse erleidet. So winzig auch das Stäubchen sein mag, es unterhält einen Umsatz, gegen den das Wechselgeschäft der größten Bank unbedeutend erscheint. Und die Bilanz stimmt — auf Heller und Pfennig können wir nicht sagen, aber sie stimmt auf Welle und Atom, das wissen wir aus dem Gesetz von der Erhaltung der Kraft.

Ehe man einen genügenden Einblick in diese Ökonomie der Natur gewinnen konnte, mußten die Zahlenverhältnisse, nach welchen die Vorgänge in der Natur geordnet sind, aufgesucht und erkannt werden, und diese Erkenntnis hat geraume Zeit beansprucht. Denn der Entwickelungsgang der physikalischen Wissenschaften ist naturgemäß ein solcher gewesen, daß zunächst die Erscheinungen ihrer Art nach beobachtet, und daß später erst die dabei stattfindenden Größenverhältnisse in Betracht gezogen wurden, daß zunächst die Frage gestellt wurde: „Was ist überhaupt in der Natur vorhanden?“ „Welche Kräfte und Wirkungen werden von den einzelnen Körpern aufeinander ausgeübt?“ und dann erst die Frage: „Wieviel ist von jeder Substanz vorhanden?“ und „Wie groß sind die gegenseitig ausgeübten Kräfte und Wirkungen?“ Der qualitative Charakter der physikalischen Forschung geht also allmählich in einen quantitativen über, erst „Zahlen beweisen“; und in der That bildet der Beginn des Messens der Größen den wichtigsten Schritt in der physikalischen Wissenschaft, und die möglichst genaue zahlenmäßige Bestimmung der in der Natur vorkommenden „Unveränderlichen“, der „physikalischen Konstanten“, bildet die Hauptaufgabe der Physik. Die glänzenden Errungenschaften, deren sich einzelne Zweige der Naturwissenschaft, z. B. die Astronomie, die Geodäsie, die Chemie, ja alle Künste der Technik und Industrie, welche von jenen abhängen, in den letzten Decennien zu erfreuen haben, verdanken sie zum großen Teile der Vervollkommnung und der Verfeinerung der Meßmethoden und der Meßapparate, deren sie sich bei ihren Untersuchungen bedienen.

Mit der Anwendung des Maßes hört das Unbestimmte in der Deutung auf. Das Maß ist ein unerbittlich strenger, aber ein treuer Freund. Denn er allein führt, richtig gehandhabt, zur rechten Würdigung der Erscheinungen und Thatsachen.

Wir messen die Quantitäten der verschiedenen Stoffe, welche wir zu chemischen Verbindungen vereinigen wollen, und daß wir genau wissen, in welchen Maßverhältnissen sie sich stets verbinden, ist unser großer Vorteil, denn wir ersparen dadurch jeden noch so geringen Materialverlust. Wir messen die Anzahl der Schwingungen, welche den verschiedenen Tönen zukommen. Wir messen die Geschwindigkeit des Lichtes, die Schnelligkeit, mit der sich die Elektrizität fortpflanzt, ja sogar die Länge der Ätherwellen, deren Schwingungen die Lichterscheinungen hervorbringen und deren größte noch nicht den tausendsten Teil eines Millimeter beträgt. Die Stärke des Erdmagnetismus messen wir, der wie eine ununterbrochene Nervenerregung hin und her schwankt, in ungemein schwachen Schwankungen freilich, welche aber durch Anwendung feiner Meßmethoden und subtiler Meßapparate nachzuweisen und ihrer Größe nach zu bestimmen sind.

„Das mag für die Wissenschaft selbst sehr interessant sein" — höre ich sagen — „für das praktische Leben aber haben dergleichen subtile Unternehmungen wohl nur einen geringen Nutzen." Zur Widerlegung dieses Einwandes dient wohl das soeben angeführte, der Chemie entlehnte Beispiel, welches unmittelbar genug in das praktische Leben eingreift. Aber auch die feinsten physikalischen Untersuchungen, welche die Ermittelung der quantitativen Verhältnisse einer Erscheinung bezwecken, erweisen sich oft ganz unmittelbar von den segensreichsten materiellen Folgen. Es kommt z. B. sehr viel darauf an, zu wissen, wie groß die Brechbarkeit eines Lichtstrahles beim Übergange von einem Medium in ein anderes ist, denn dieselbe ist ein wichtiges Mittel, um die Eigenschaften der Gläser genau kennen zu lernen, auf deren richtiger Verwendung die Herstellung optischer Instrumente beruht. Jedes Stück Glas, aus welchem eine Linse für ein Fernrohr, ein Prisma für ein Spektroskop oder sonst ein Teil eines guten optischen Apparates hergestellt werden soll, wird durch jenes Mittel vorerst auf seine Leistungsfähigkeit geprüft und danach ihm die geeignete Form gegeben. Ob Zucker oder gewisse andere Stoffe in einer Lösung enthalten sind und wie viel, zeigt ein Blick auf die Winkeldrehung, die die Schwingungsebene eines Lichtstrahls von gewisser Brechbarkeit erfährt, wenn er durch eine Schicht jener Flüssigkeit gegangen ist. Auf andere Weise würde man stundenlang zu arbeiten haben, um die Frage zu erledigen, die sich so innerhalb weniger Minuten beantworten läßt. In der Raschheit dieser Ermittelung hat aber die Rübenzuckerfabrikation eine ganz wesentliche Unterstützung. Wir brauchen gar nicht an die Spektralanalyse zu erinnern, welche nicht nur sofort das Vorhandensein verschiedener Stoffe in einer Verbindung nachzuweisen ermöglicht, sondern auch die Entdeckung vorher unbekannter Stoffe unserer Erde herbeigeführt hat, durch nichts weiter als durch genaueste Prüfung der von den glühenden Körpern ausgehenden Lichtstrahlen in Bezug auf ihre Brechbarkeit oder auf ihre Wellenlänge. Weitere Beispiele aus dem Gebiete der Physik oder Chemie werden die folgenden Kapitel dieses Bandes in überreicher Zahl liefern.

Die Festsetzung von Maßen und die Anwendung von Meßmethoden ist also nicht bloß für die exakten Wissenschaften von höchstem Wert, sondern genau ebenso für das bürgerliche Leben. Und diese Thatsache, welche schon aus den einfachsten Beziehungen der Völker zu einander sich ergibt, beim ersten Tauschversuche sich bemerklich macht, hat frühzeitig auf die Notwendigkeit der Ausbildung von Zahl- und Maßsystemen hingearbeitet. Selbstverständlich genügten in den ersten Zeiten Grade der Genauigkeit, mit denen wir uns jetzt auch im gewöhnlichsten Verkehr nicht mehr begnügen. Alle Güter, und ganz besonders die Zeit haben einen höheren Wert erhalten, der auch nicht das geringste Teilchen mehr vernachlässigen läßt.

Ein jeder Maßausdruck für eine physikalische Größe setzt sich aus zwei Faktoren zusammen, nämlich aus einer als Einheit der physikalischen Größe anzunehmenden ihr gleichartigen Größe und einer unbenannten Zahl, und „eine physikalische Größe messen" heißt: sie ausdrücken durch eine Zahl und durch jene als Einheit anzunehmende ihr gleichartige Größe. Wenn wir sagen, die Länge dieser Säule beträgt 12 m, so setzt sich der Maßausdruck aus zwei Teilen zusammen, nämlich der

Zahl „12“ und dem als Einheit der Länge angenommenen „Meter“. Da nun die Größen, welche in der Physik ihre Behandlung finden, der mannigfaltigsten Art sind, z. B. Volumina, Geschwindigkeiten, Kräfte, Dichtigkeiten, galvanische Leitungswiderstände u. s. f., so würde, um alle diese Größen messen zu können, auch eine entsprechend große Anzahl von Einheiten festzusetzen sein, also eine Einheit zur Messung des Volumens, eine Einheit zur Messung von Geschwindigkeiten, eine Einheit für Kräfte, desgleichen besondere Einheiten für Dichtigkeiten, für galvanische Leitungswiderstände u. s. f. Dieselben sind aber auf drei Fundamentaleinheiten zurückzuführen. Es lassen sich nämlich alle physikalischen Erscheinungen, die mechanischen ebenso wie die Licht-, Wärme- und elektrischen Erscheinungen in letzter Instanz zurückführen auf Bewegungen, welche teils für unsere Sinne wahrnehmbar, teils Bewegungen molekularer Natur sind, die sich wegen ihrer Kleinheit der direkten Wahrnehmung durch unsere Sinne entziehen. Jede Bewegung aber setzt drei Grundbegriffe voraus, ein Etwas, das sich bewegt, ein Substrat der Bewegung, das wir Materie oder Masse nennen, einen Raum, in welchem die Bewegung vor sich geht, und eine Zeit, welche zu der Bewegung gebraucht wird. Es werden daher zur Messung der Bewegungen zunächst drei Einheiten festzusetzen sein, eine Einheit für die Masse, eine Einheit für den Raum und eine Einheit für die Zeit. Solche Einheiten nennt man natürliche Einheiten, wenn sie direkt der Natur entlehnt sind, und wenn sie durch Übereinkommen festgesetzt sind, konventionelle Einheiten. Die Hauptanforderungen, welche wir an sie stellen, sind die, daß sie unveränderlich und stets reproduzierbar seien, damit sie, wenn sie durch einen unglücklichen Zufall verloren gehen sollten, stets von neuem leicht und sicher wieder hergestellt werden können.

Maße der Alten. Das erste historische Grundmaß für die Länge, also auch für den Raum, ist ein natürliches; es ist von den Dimensionen einzelner Glieder des menschlichen Körpers oder den mit den Körperteilen abzureichenden Strecken abgeleitet. Arm, Elle, Fuß, Zoll, Spanne, Schritt sind die ursprünglichsten Maßeinheiten, denen wir bei fast allen Kulturvölkern des Altertums begegnen. Ihres ehrwürdigen Alters wegen erfreuen sich diese Einheiten daher auch bis auf den heutigen Tag, namentlich bei den Archäologen einer so großen Beliebtheit, daß beinahe in jedem Jahre die metronomische Litteratur durch eine Schrift bereichert wird, in welcher die Einführung etwa des Schrittmaßes als des historisch am meisten begründeten und auf natürlichster Grundlage beruhenden immer und immer wieder empfohlen wird. Da aber in allen organischen Gebilden die größte Mannigfaltigkeit und immerwährende Veränderlichkeit herrscht, und da die Individuen, von denen die Maße abzuleiten wären, leider sterblich sind, so werden die Hauptanforderungen, die wir an ein Normalmaß stellen, nämlich, daß es unveränderlich und stets reproduzierbar sei, durch die Wahl dieser natürlichen Einheiten noch in keiner Weise erfüllt. Diese Entstehungsart der Längeneinheit erklärt aber wohl die Verschiedenheit der bei den einzelnen Völkern üblichen Maßeinheiten. Mit der Entwickelung des Bildungsgrades der Völker mußte frühzeitig für die Sicherung des üblichen Normalmaßes Sorge getragen werden. Dazu genügte freilich anfangs, dasselbe in eine Mauer großer öffentlicher Gebäude einzumauern, später es an öffentlichen Orten und bei den Behörden aufzubewahren. Mit dem Aufblühen des Handels und der Erweiterung des Verkehrs der Völker machte sich aber das Bedürfnis fühlbar, das im Lande übliche Maß genauer zu bestimmen und es mit den in anderen Ländern gebräuchlichen zu vergleichen, und bereits um die Mitte des 17. Jahrhunderts trat der Gedanke der Herstellung eines universellen unveränderlichen Naturmaßes hervor.

Bevor wir indessen zur Schilderung der Entwickelung und Begründung des metrischen Maßsystems übergehen, wollen wir des kulturhistorischen Interesses wegen eine kurze Behandlung dem Maßsysteme der Alten widmen.

Die bewundernswürdigen Meßmethoden, die wir heutzutage zur Lösung physikalischer Fragen in Gebrauch sehen, waren den Alten unbekannt, sie sind erst eine Errungenschaft der Neuzeit. Die Alten kannten zwar Linien-, Flächen- und Körpermaße, sie kannten die Begriffe des absoluten und des spezifischen Gewichts der Körper und vermochten es zu bestimmen; sie hatten Methoden, die Zeit zu bestimmen und Winkel zu messen, und das

sind im wesentlichen die Grundlagen jedweder Maßbestimmung. **Die Anwendung selbst** aber ermangelte natürlich der Genauigkeit, die uns heute zu Gebote steht. Die Thatsache, welche beim Lesen alter Schriftsteller auffällig ist, daß nämlich alle Maßangaben fast nur in runden Zahlen gemacht werden, läßt vermuten, daß auch in der Festsetzung der Maße selbst keine große Genauigkeit geherrscht haben mag. Und wenn es jetzt mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, aus den sich oft widersprechenden Angaben genauere Vorstellungen von der Größe der alten Maße sich zu bilden, so liegt das eben daran, daß mit demselben Namen mehr oder weniger verschiedene Maßgrößen bezeichnet worden sind.

Es nimmt nicht wunder, daß wir Maße und Meßmethoden bei dem alten Kulturvolk, den Ägyptern, zuerst in ausgedehntem Gebrauche sehen, da sie vielseitige Bildung und reiche Kenntnisse, besonders auf den Gebieten der Naturwissenschaften, besaßen, und die Herstellung ihrer großartigen Werke der Baukunst eine sorgfältigere Anwendung der Maße zur Vorbedingung machte. Indes ist es wohl zu viel behauptet, wenn man den Ägyptern zuschreibt, daß sie ihre Maße von den natürlichen Dimensionen der Erde abgeleitet, mithin schon vor 3500 Jahren die Herstellung eines universellen unveränderlichen Naturmaßes verwirklicht hätten.

Man stützt die Ansicht, daß das Normalmaß der Ägypter von dem Umfange der Erde abgeleitet worden sei, darauf, daß angeblich die Seite der Basis der großen Pyramide von Memphis 500mal genommen, die Elle des Nilometers (des Nilmessers), auch heilige Elle genannt, 200000mal genommen, die Länge des Stadiums zu Laodicea 500mal genommen, genau die Länge eines Grades der Erde haben soll. Durch diese Beziehungen und eine Menge anderer Belegstellen aus den alten Schriftstellern versucht man nachzuweisen, daß die Ägypter schon eine Gradmessung ausgeführt, auf Grund derselben die Dimensionen unserer Erde berechnet und daraus ihr Maßsystem abgeleitet hätten. Die Annahme einer solchen Gradmessung, welche von Eratosthenes zwischen Syene und Alexandrien ausgeführt worden sein soll, ist aber sehr unsicher. Wir trauen in dieser Beziehung allen alten Kulturvölkern wahrscheinlich zu viel zu, und diese übertriebene Wertschätzung wird leicht genährt durch die Neigung der Altertumsforscher, gern überraschend tiefe Beziehungen da zu entdecken, wo oft nur der Zufall sein Spiel getrieben haben mag.

Die ägyptischen Längenmaße waren von den Dimensionen der menschlichen Gestalt abgeleitet. Die mittlere Länge des Menschen (die Orgyie = 1,85 m) wurde in vier Teile geteilt, deren einer Elle genannt wurde. Der sechste Teil der Orgyie war der Fuß. Kleinere Maße waren von der Spannweite (Spithame), der Breite der Hand (Palme) und der Breite des Fingers (Daktylos) abgeleitet. Die Länge des Schilfrohrs (Kalamos) gab die Rute = 10 ägyptische Fuß; 60 Ruten waren ein Stadium u. s. w. Interessante Maßbeziehungen will man auch in den Größenverhältnissen der Pyramiden gefunden haben.

In einem Lande wie Ägypten, in welchem durch die jährlichen Überschwemmungen alle Grenzmarken verwischt und dadurch häufig wiederkehrende Regulierungen notwendig wurden, war die Festsetzung einer Maßeinheit für die Fläche eine sehr wichtige Aufgabe des öffentlichen Lebens. Das gebräuchlichste Flächenmaß war die Arura, ein Quadrat von 100 Ellen Seitenlänge.

Mit den Maßen der Hebräer werden wir durch die biblischen Überlieferungen vertraut, welche in der Tempelbeschreibung namentlich sehr genaue Maßangaben enthalten. Sie scheinen sämtlich ägyptischen Ursprungs zu sein. Die Tagereise hatte 200 ägyptische Stadien, etwa 37000 m; die Meile hatte 1000 Schritt. Es gab zweierlei Fußmaße, den großen legalen Fuß, Seraim, = 0,3674 m, und den kleinen, Sereth, = 0,2771 m u. s. w.

Sehr ausgebildet war das Maßsystem bei den Arabern, jener Nation, welche nicht nur mit Ägypten, sondern weithin an den Gestaden des Mittelmeeres und nach Asien hin einen ausgebreiteten Handelsverkehr unterhielt. Die Breite eines Kamelhaares bildete das kleinste Maß, und die Kleinheit dieses Maßes — wahrscheinlich etwas weniger als ein halbes Millimeter — läßt darauf schließen, daß die Größenbestimmungen der Araber einen verhältnismäßig hohen Grad der Genauigkeit erreicht haben müssen. Die Breite, welche von sechs nebeneinander gelegten Gerstenkörnern eingenommen wurde, war ein anderes Maß. Sie besaßen ferner als Maße den Daktylos, die Palme, den Fuß, mehrere

Ellen, unter denen namentlich die sogenannte „schwarze Elle“ des Al-Mamum bemerkenswert ist, weil nach ihr die Gradmessung unter diesem Kalifen ausgeführt wurde. Die schwarze Elle hatte 27 mal das Maß von 6 Gerstenkörnern = 0,5196 m. Außerdem hatten die Araber eine ägyptische oder Handelselle, die persische, königliche, sogenannte große Elle des Heron, den Schritt, die Rute, die Orgyie, und als größeres Maß die Parasange, deren 20 einen ägyptischen Grad ausmachten.

Die **Griechen** haben ihre meisten Maße von den Ägyptern erhalten und sie dann wieder den Römern übergeben. Von spezifisch griechischen Maßen ist der Dolichos anzuführen — die Länge des Weges, welchen die wettfahrenden Wagen bei den öffentlichen Spielen zurückzulegen hatten. Nach einigen Schriftstellern hatte derselbe 12, nach andern 20, ja sogar bis 24 Stadien. Das Stadion, deren es mehrere gab, ist von schwankender Länge; das eine war etwa 600 griechische Fuß lang, während das olympische Stadion ungefähr $^1/_{40}$ einer geographischen Meile betrug. Der halbe Dolichos, die Entfernung von einem Ende der Rennbahn zum andern, war der Diaulos. Dromos war der Weg, den ein Schiff mit Segeln oder Rudern in 24 Stunden zurücklegt — alles Maße, denen wohl ein sportliches Interesse anhaftet, die aber in ihrer Unsicherheit wenig für genaue Bestimmungen geeignet erscheinen. Die kleineren Maße waren von den Ägyptern übernommen.

Gewichtsangaben machten die Griechen nach Talenten, deren es gleichfalls mehrere gab; das kleinste, das syrische oder ptolemäische, entsprach einem Gewicht von ungefähr 7 kg, während das größte, das äginetische, ungefähr 45 kg gewogen zu haben scheint. Das Talent wurde eingeteilt in 60 Minen, die Mine in 100 Drachmen. Den sechsten Teil einer Drachme sollte der Obolos wiegen, die kleine Münze, welche dem Charon als Fährgeld über die schwarzen Fluten des Styx gewährt werden mußte.

Die griechischen Maße sind, wie schon erwähnt, später bei den **Römern** vielfach in Gebrauch gekommen. Vorher jedoch hatten diese auch eigene Maße, die mit größerer Sorgfalt gehütet worden zu sein scheinen, als bei dem leichtlebigen Volke der Hellenen.

Die Grundmaße wurden aufbewahrt und genaue Kopieen derselben in Bauwerken eingehauen. Auf dem Kapitol gab es vier solcher Marken des Fußmaßes, aus denen sich durchschnittlich eine Länge von 0,2959 m für den römischen Fuß ergibt. Andere Fuß-Etalons, die man hier und da gefunden hat, weichen von dieser Länge selten um 1 mm ab, in gut erhaltenem Zustande aber zeigen sie bisweilen Übereinstimmungen bis auf 0,1 mm.

Das kleinste römische Längenmaß war der Digitus (0,0185 m); dann folgt die Unica (0,0246 m), die Palma (0,0739 m), der Pes (0,2959 m), der Palmipes (0,3659 m), der Cubitus (0,4434 m), der Passus (1,478 m), die Pertica (2,9562 m). Die römische Meile hatte 500 Ruten (Pertica) und die Tagereise, Iter pedestre, 18,75 solcher Meilen. Als Feldmaß galt das Jugerum, d. i. diejenige Fläche, welche ein Joch Ochsen in einem Tage umpflügen konnte. Frucht- und Flüssigkeitsmaße waren genau bestimmt; die Grundlage der ersteren war ein Scheffel (modius), diejenige der letzteren die Amphora, deren Inhalt genau einen römischen Kubikfuß betrug. — Das römische Gewichtssystem hatte sich bis vor kurzem noch in unseren Apothekergewichten erhalten. Das Pfund (libra) wurde in 12 Unzen (uncia), diese in 24 Skrupel (scrupulum) und letzteres in 20 Grane (granum = Korn) eingeteilt.

Infolge der reichsgesetzlichen Einführung des metrischen Systems ist das alte Apothekergewicht im ganzen Deutschen Reiche beseitigt und das Grammsystem mit der Einführung der allgemeinen deutschen Pharmakopöe zum Medizinalgewichtssystem erklärt worden. In Frankreich bestand dasselbe übrigens schon seit 1840.

Wenn uns die Maße der alten Kulturvölker, der Ägypter, Juden, Griechen und Römer ganz besonders interessieren, so ist dies natürlich, denn unsere moderne Bildung hat sich aus der Erbschaft, die uns von jenen überkommen ist, entwickelt, und die im Altertum gebräuchlichen Anschauungen haben ihre Wirkung auf uns auch heute noch nicht verloren. Von den Maßen anderer alten Kulturvölker, z. B. der **Chinesen**, die ohne innere Beziehung zu unserer Kultur stehen, sei hier nur bemerkt, was aus den bisher

aufgeführten Thatsachen auch schon hervorgeht, daß sie nämlich zuerst und naturgemäß von solchen Größen abgeleitet sind, welche die Natur immer in nahezu denselben Dimensionen hervorbringt, und welche dem Menschen jederzeit zur Hand sind, so daß er sie zur Vergleichung leicht heranziehen kann. Derartige Größen sind vor allen die menschliche Hand, der Fuß, die Länge des Armes, die Weite eines Schrittes, und wir finden dieselben deshalb fast überall als erste Maßeinheiten für Längenbestimmungen in Gebrauch.

Bestrebungen zur Herstellung eines einheitlichen Maßsystems. Im Jahre 1664 machte Huyghens den genialen Vorschlag, die Länge des einfachen Sekundenpendels, welche unveränderlich sei und jederzeit durch das Experiment neu bestimmt werden könne, der Maßbestimmung zu Grunde zu legen. Durch die bald darauf von Richer gelegentlich seiner Pendelbeobachtungen in Cayenne gemachte Entdeckung, daß die Länge des Sekundenpendels wegen der mit dem Breitengrade sich ändernden Größe der beschleunigenden Kraft der Schwere an verschiedenen Orten der Erde eine verschiedene ist, verlor der Huyghenssche Vorschlag etwas von seinem universellen Charakter, da man nun die Länge des Sekundenpendels für einen ganz bestimmten Ort der Erde als Einheit festsetzen mußte. So empfahl 1740 Condamine als Maßeinheit die Länge des Sekundenpendels unter dem Äquator, Bouguer dagegen diejenige unter dem 45. Breitengrade.

Wenn man nicht annehmen will, daß die alten Ägypter schon ihr Maßsystem von den Dimensionen der Erde selbst abgeleitet, so werden wir den Ruhm, die großartige Idee zuerst ausgesprochen zu haben, dem Lyoner Astronomen Gabriel Mouton nicht vorenthalten dürfen. In seinem 1670 in Lyon erschienenen Werke „Observationes Diametrorum“ schlägt er vor, die Länge des Meridianbogens von einer Minute unter dem Namen Milliare oder Meile zur Normaleinheit zu machen, welche dann weiter nach dem Dezimalsystem in Centuria, Decuria, Virga, Virgula, Decima, Centesima, Millesima geteilt werden sollte.

Das Verdienst, aus den Dimensionen der Erde ein rationelles Maßsystem, das sich zu einem internationalen vollständig eignet, abgeleitet zu haben, gebührt unzweifelhaft den Franzosen, und namentlich hat Laplace bedeutenden Anteil an der Ausführung dieser Idee. Im Jahre 1790 wurde zur Begründung eines auf der Sekunden-Pendellänge als Einheit basierenden Maßsystems von Talleyrand-Périgord eine Kommission ernannt, bestehend aus den berühmten Männern Borda, Condorcet, Lagrange, Laplace und Monge, die sich aber gegen die Wahl der Pendellänge als Einheit für das Längenmaß aussprachen, weil dieselbe zu ihrer Bestimmung die Einführung eines neuen Elementes, der Zeit, und überdies der willkürlichen Einteilung des mittleren Sonnentages in 86400 Sekunden benötigte. Sie schlugen vielmehr vor, vermutlich, weil man aus wissenschaftlichem Interesse wieder eine Gradmessung ausführen wollte, durch eine Gradmessung die Größe des Erdquadranten, also die Entfernung des Nordpols vom Äquator, im Meridiane gemessen, zu bestimmen und deren zehnmillionten Teil unter dem Namen „Meter“ als Maßeinheit anzunehmen, außerdem aber auch gewissermaßen als Kontrollmaß die Länge des einfachen Sekundenpendels unter dem 45. Breitengrade zu ermitteln. Die Pendelbeobachtungen wurden von Cassini und Borda mit außerordentlicher Genauigkeit ausgeführt, die Gradmessungen zwischen Dünkirchen und Barcelona von Méchain und Delambre. Während diese letzteren Gradmessungen zu dem Zwecke angestellt werden sollten, eine neue Längeneinheit zu bestimmen, war umgekehrt etwa 60 Jahre früher für zwei von Frankreich aus nach Lappland (unter Maupertuis, Clairaut und Othier) und nach dem Äquator (unter Condamine und Bouguer) veranstaltete geodätische Expeditionen das damals in Frankreich übliche Längenmaß, die Toise, einer genauen Revision unterzogen und für die von der Expedition auszuführenden Gradmessungen zwei Toisen als Normalmaßstäbe angefertigt worden, welche sich mit den damals in Frankreich gebräuchlichen in möglichster Übereinstimmung befanden. Von diesen beiden Normaltoisen wurde die eine in Lappland gebrauchte durch Schiffbruch beschädigt, die andere in Peru gebrauchte blieb unversehrt und bestimmte unter dem gesetzlich festgestellten Namen der „Toise du Pérou“ die Einheit des französischen Längenmaßes. Dieser seitdem so berühmt gewordene Maßstab ist ein

Endmaß aus Eisen (étalon à bouts), im Jahre 1735 von Langlois verfertigt, hat seine wahre Länge bei 13° R. und ist eingeteilt in 6 Fuß, der Fuß in 12 Zoll, der Zoll in 12 Linien. In diesen Linien wurde nun die aus der neuesten Gradmessung (Barcelona-Dünkirchen) gewonnene Längeneinheit, das Meter, ausgedrückt und die wahre Länge desselben als mètre vrai et définitif zu 441,296 Linien der Toise du Pérou gesetzlich festgestellt. Das mètre vrai et définitif ist ein von Lenoir verfertigter Platin-Endmaßstab, der seine wahre Länge bei der Temperatur des schmelzenden Eises, die wir 0° C. nennen, hat; er wird im Conservatoire des arts et métiers zu Paris aufbewahrt und ist unter dem Namen „mètre des Archives" das Urmaß für sämtliche im Gebrauche der verschiedenen Nationen befindlichen Meter. Die Grundlage des neuen französischen Längenmaßes ist also eigentlich die Toise du Pérou geblieben, das Meter ist nur ein gesetzlich bestimmter Teil derselben, welcher annäherungsweise den zehnmillionten Teil des Erdquadranten darstellt und statt der Duodezimalteilung der Toise die bequemere Dezimalteilung enthält.

Während der Ausstellung in Paris 1867 wurde innerhalb einer besonders dazu eingesetzten Kommission aus Vertretern aller Nationen die Frage einer allgemeinen Maß-, Gewichts- und Münzeinigung ganz ausführlich wieder erörtert. Im Mittelpunkte des Ausstellungsgebäudes, da, wo sämtliche Straßen aus den Ausstellungsgebieten aller Länder der Erde zusammenliefen, erhob sich ein Pavillon, in welchem die verschiedenen Maße und Münzen der betreffenden Länder, erstere in genauen Etalons, vereinigt waren. Die Ausstellung in dem runden tempelartigen Bau war bei aller ihrer Mannigfaltigkeit noch lange keine erschöpfende. Deutschland allein hätte den Pavillon auszufüllen vermocht, wenn es die vielen Hunderte verschiedener Ellen und Fuße in Maßstäben ausgestellt hätte, die in den einzelnen Ländern und Ländchen damals noch in Gebrauch oder wenigstens noch nicht abgeschafft und noch nicht durch ein einheitliches Maß ersetzt waren. Unter sich gleiches Maß besaßen Frankreich, Italien, Spanien, Portugal, Belgien, Holland, Chile, Peru, Neugranada, Bolivia, Venezuela, sowie Französisch- und Holländisch-Guinea, in denen das französische Metermaßsystem eingeführt war. Die übrigen Staaten, unter ihnen England, Deutschland, Rußland, hatten noch jeder sein eigentümliches Maß. Doch wurde in den Beratungen der Kommission das Bedürfnis einer allseitigen Einigung erkannt, das Metermaßsystem als das geeignetste für die allgemeine Annahme erklärt und seine Einführung empfohlen.

Als „maßgebend", im vollen Sinne des Wortes, sind für ein internationales Maßsystem folgende Bestimmungen festgestellt worden:

1. Die Einheit muß eine unveränderliche sein; sie soll durch bekannte, möglichst einfache Arbeiten zu jeder Zeit aus gewissen, in der Natur vorkommenden unveränderlichen Dimensionen abzuleiten und möglichst bequem zu handhaben sein.

2. Das auf die Einheit begründete System soll in seinen Ober- und Unterabteilungen ausschließlich der Dezimalteilung folgen: Längen-, Flächen-, Körpermaße u. s. w. sollen einen natürlichen, einfachen und leicht übersichtlichen Zusammenhang zeigen, die Bezeichnung der einzelnen Maße soll eine systematisch wechselseitige sein, so daß durch den Namen der einzelnen Maßgrößen das Verhältnis zwischen ihnen ausgedrückt wird.

Darauf, daß die Maßeinheit eine natürliche, d. h. eine solche sei, welche zu jeder Zeit aus gewissen in der Natur vorhandenen und unveränderlichen Dimensionen leicht abgeleitet werden kann, ist aber nicht so großes Gewicht zu legen. Denn da es nicht den Sinn haben kann, daß eine solche natürliche Dimension selbst als Maßeinheit genommen werden soll, sondern nur eine davon abgeleitete Größe, welche in ihrer Handlichkeit den praktischen Anforderungen entspricht, so daß also nur das Verhältnis zwischen dieser Maßgröße und einer natürlichen unveränderlichen Dimension genau bekannt sein soll, so kann man jede willkürlich gewählte Einheit zu einer natürlichen dadurch machen, daß man eben jenes Verhältnis ganz genau bestimmt. In dieser Weise ist z. B. das englische Yard definiert, und das darauf bezügliche System kann als ein natürliches gelten; denn man hat die Länge des Sekundenpendels zu London genau gemessen, und eine Parlamentsverfügung vom 17. Juni 1824 setzte fest, daß die Länge des Yard zur Länge des

Sekundenpendels sich verhalte wie 36 : 39,13929 in der Breite von London, auf den Meeresspiegel und den luftleeren Raum reduziert und bei 62° Fahrenheit gemessen. Ein englischer Kubikzoll destilliertes Wasser von 62° F. soll bei 30 engl. Zoll Barometerhöhe nach derselben Bestimmung 252,458 Grains eines Pfundes wiegen, welches 5760 solcher Grains enthält. Es kann also die Einheit wohl eine natürliche sein, sie muß aber dann unter allen Umständen für alle Bewohner der Erde ein gleiches Interesse haben.

Solcher natürlichen Einheiten sind hauptsächlich zwei in Vorschlag gebracht worden. Der Weg, welchen ein im luftleeren Raume freifallender Körper in der Zeitsekunde an einem bestimmten Orte der Erde zurücklegt, ist eine bestimmte Größe, von welcher die Länge des einfachen Sekundenpendels abhängig ist. Ein einfaches oder mathematisches Pendel denkt man sich bestehend aus einem materiellen Punkt, welcher an einem gewichtslosen, unbiegsamen und unausdehnbaren Faden aufgehängt ist. Die Länge eines solchen einfachen Pendels, dessen Schwingungsdauer gerade eine Sekunde beträgt, läßt sich nun mit Hilfe eines materiellen oder physischen Pendels nach gewissen Methoden berechnen, und die so gefundene Länge ist eine für denselben Ort ganz bestimmte, durch Wiederholung der Versuche immer wieder zu findende Größe, d. h. eine natürliche Einheit.

Eine andere natürliche Einheit wäre gegeben durch die Entfernung zweier bestimmten Punkte auf der Erdoberfläche, deren Messung zu jeder Zeit wiederholt werden kann.

Eine dritte natürliche Einheit bietet die Wellenlänge eines bestimmten Lichtstrahls, welche, wie in der Optik des näheren gezeigt werden soll, immer wieder von neuem bequem und sehr genau bestimmt werden kann.

Der Hauptvorzug des metrischen Maßsystems beruht nicht sowohl auf dem theoretischen, absoluten Werte der angenommenen Einheit, die allerdings wesentlich zur allgemeinen Verbreitung desselben beigetragen hat, sondern auf der Thatsache, daß alle Teile desselben durch ein äußerst bequemes und übersichtliches Dezimalsystem mit einander zusammenhängen, sowie auf den einfachen Beziehungen, die zwischen der Volumeneinheit und Gewichtseinheit bestehen, auf die wir noch zu sprechen kommen werden. Trotz dieser allseitig anerkannten Vorzüge hat das metrische System nur sehr langsam Boden gewinnen können. Man machte ihm von kompetenter Seite und wohl mit Recht den Vorwurf, daß die als Einheit festgesetzte Länge eine unpraktische, von der üblichen zu stark abweichende und den Bedürfnissen des Handels und Verkehrs nicht entsprechende sei; dazu kommt die Macht der Gewohnheit, an Althergebrachtem festzuhalten, die nationale Eifersucht und Eitelkeit, Eigentümliches zu wahren, sowie die natürliche Scheu und Abneigung vor einer so tief eingreifenden Neuerung, wie es die Einführung eines neuen und überdies in Bezug auf die praktischen Erfolge noch nicht genügend erprobten Maßsystems ist.

Allmählich aber mußten dergleichen Engherzigkeiten schwinden vor dem großartigen Gedanken eines allen Völkern gemeinsamen Maßsystems, gewissermaßen einer gemeinsamen, allgemein verständlichen Sprache in allen quantitativen Fragen technischer und wissenschaftlicher Untersuchungen. Ein solches zu werden hatte nun einmal das metrische System durch die ihm zu Grunde liegende Idee die größte wissenschaftliche Berechtigung, und so haben in der That in der neuesten Zeit stillschweigend alle zivilisierten Nationen, die selbst ein gut durchgebildetes Maßsystem, wie z. B. Preußen, besaßen, dem französischen Metermaß den Vorzug eines allgemeinen Maßes zuerkannt, und auch fast alle das „Mètre des Archives" als Grundmaß angenommen. So hat der Norddeutsche Bund durch ein Gesetz vom 17. August 1868 das Meter als Basis für die Maße und Gewichte angenommen und als Normalmaß das im Besitze der preußischen Regierung, jetzt im Gewahrsam der Kaiserlich Deutschen Normal-Aichungs-Kommission befindliche Platina-Meter festgesetzt, welches durch eine im Jahre 1863 von Preußen und Frankreich ernannte Kommission = 1,00000301 des „Mètre des Archives" gefunden worden ist. So haben verschiedene Regierungen für ihre Staaten beglaubigte Kopieen des Meter anfertigen lassen, um den Bedürfnissen der Wissenschaft, des Handels und der Industrie zu genügen. Allein diese Kopieen waren unabhängig von einander, nach verschiedenen Methoden und aus verschiedenem Material hergestellt und bei verschiedenen Temperaturen mit dem französischen Urmaß verglichen worden, und dieser Mangel an Einförmigkeit ließ befürchten, daß, wenn

nicht mit aller wissenschaftlichen Strenge gemeinsam vorgegangen würde, die Existenz eines einheitlichen Maßsystems wohl bald wieder in Frage gestellt würde. Der Umstand, daß die französischen Gelehrten die Aufbewahrung und Verwaltung der metrischen Urmaße ausschließlich Frankreich vorbehielten, wirkte hindernd auf die allgemeine Einführung derselben. Staaten, welche dieselben einzuführen oder für die Bedürfnisse der Wissenschaft und der Industrie wenigstens authentische Kopieen hergestellt zu haben wünschten, mußten die Vergleichungen derselben mit den Urnormalen entweder durch französische Beamte ausführen lassen oder Gelehrte nach Paris senden. Für solche Vergleichungen wurden in der Regel Komparatoren zur Verfügung gestellt, welche den modernen Anforderungen der Präzisionsmeßkunst nicht mehr genügten, so daß häufig fremde Gelehrte mit ihren eigenen Komparatoren nach Paris reisen mußten, um dort die Vergleichungen auszuführen. Um die Prototype, welche wegen ihrer Herstellung aus nicht ganz reinem und zu weichem Platin nicht genügende Garantie gegen ihre Unveränderlichkeit boten, möglichst zu schonen, mußte man sich ferner bei den Vergleichungen mit Kopieen begnügen, die nicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmt waren. So wurde die Erlangung genauer Kopieen schwierig, und die Folge davon war, daß bei Maßvergleichungen selbst in einem und demselben Lande Abweichungen auftraten, die den Betrag der Beobachtungsfehler um das Hundertfache überstiegen.

Um diesen Mißständen abzuhelfen, wurde von den verschiedensten Seiten, von vielen wissenschaftlichen Korporationen, internationalen, statistischen und geodätischen Kongressen, namentlich aber von dem Petersburger Akademiker Jacobi dem Wunsche Ausdruck gegeben, eine internationale Kommission einzusetzen zur Feststellung neuer metrischer Prototype und Kopieen für alle Länder, sowie zur Begründung eines ständigen, festorganisierten internationalen Bureaus für Maßvergleichungen. Infolgedessen sah sich im Jahre 1870 die französische Regierung, welche sich anfänglich aus naheliegenden Gründen ablehnend oder zum mindesten kühl gegen diese Vorschläge verhalten hatte, endlich genötigt, die zivilisierten Staaten der Erde zu einer internationalen Konferenz einzuladen, welche aber wegen der kriegerischen Ereignisse bis auf weiteres vertagt werden mußte.

Im Jahre 1872 fand dann auf eine abermalige Einladung der französischen Regierung eine internationale Konferenz statt, welche den Beschluß faßte, unter Zugrundelegung der französischen metrischen Prototype neue internationale metrische Prototype, zunächst nur für die auf der Konferenz vertretenen 28 Staaten anzufertigen, und gleichzeitig ein permanentes Komitee der internationalen Meterkommission für die Leitung der Verhandlungen und Geschäfte ernannte. Auf Anregung des letzteren wurde nun am 1. Februar 1875 zu Paris eine diplomatische Konferenz einberufen, bei welcher die Mehrzahl der Staaten, die im Jahre 1872 an der internationalen Meterkonferenz teilgenommen hatten, durch ihre Minister oder Gesandten in Paris und durch besondere wissenschaftliche Abgeordnete vertreten waren. Die Mehrzahl derselben, welche mit der Ausarbeitung eines Vertragsentwurfes, betreffend die dem internationalen Maß- und Gewichts-Bureau zu gebende Organisation, betraut worden waren, legten der Konferenz einen Entwurf vor, der endlich nach vielen auf das politische Gebiet hinübergespielten Auseinandersetzungen am 20. Mai 1875 von den Vertretern folgender Staaten unterzeichnet wurde: Deutschland, Österreich-Ungarn, Belgien, Brasilien, Argentinische Republik, Dänemark, Spanien, Vereinigte Staaten von Nordamerika, Frankreich, Italien, Peru, Portugal, Rußland, Schweden und Norwegen, Schweiz, Türkei und Venezuela. Dem Vertrage zufolge, welcher, zunächst auf 12 Jahre abgeschlossen, mit dem 1. Januar 1876 in Kraft trat, und zu welchem der Beitritt jedem Staate freisteht, ist auf gemeinsame Kosten ein permanentes wissenschaftliches Institut, das seinen Sitz in Paris hat, unter dem Namen „Internationales Bureau für Maß und Gewicht" gegründet worden. Seine Oberleitung ist einem internationalen Komitee anvertraut, welches seinerseits wieder unter die Autorität einer aus den Vertretern der den Vertrag schließenden Regierungen gebildeten „Generalkonferenz für Maß und Gewicht", in welcher der jeweilige Präsident der Pariser Akademie den Vorsitz führt, gestellt ist.

Dieses im Pavillon von Bréteuil nahe bei Sèvres gelegene, mit allen Hilfsmitteln moderner Präzisionsmeßkunst ausgerüstete Bureau ist nach dem Artikel 6 der Konvention,

welcher von den Funktionen des internationalen Bureaus für Maß und Gewicht handelt, mit folgenden Aufgaben betraut:

1. Sämtliche Vergleichungen und Verifikationen der neuen Prototype und ihrer Kopieen jetzt und in Zukunft auszuführen;

2. die neuen internationalen Prototype aufzubewahren;

3. die neuen Prototype mit den nicht metrischen, in den verschiedenen Ländern und in den Wissenschaften gebräuchlichen oder gebräuchlich gewesenen zu vergleichen;

4. die Vergleichungen sämtlicher Präzisionsmaße und -gewichte auszuführen, deren Beglaubigung von Regierungen, Behörden, gelehrten Gesellschaften oder Privaten gewünscht wird.

Als Material für die neuen Prototype wurde eine Legierung von 90 % Platin und 10 % Iridium gewählt, welche nach den Methoden des berühmten Pariser Chemikers St. Claire-Deville vollkommen rein dargestellt werden konnte und vermöge seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften alle Garantie für Unveränderlichkeit darzubieten schien.

Von anderer Seite war der Beryll, namentlich aber der Bergkrystall wegen seiner Härte, seines geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten und seiner Unveränderlichkeit als das geeignetste Material für Urnormale hervorgehoben worden. Professor Kekulé in Bonn wies nämlich darauf hin, „daß alle amorphen Körper, seien sie dargestellt durch Gießen, Pressen, Walzen, Hämmern oder Prägen, in sich das Bestreben besitzen, in einen krystallinischen resp. krystallisierten Zustand überzugehen. Alle Moleküle eines derart dargestellten Körpers befinden sich in einer mehr oder weniger gezwungenen Lage und sind bestrebt, in die Gleichgewichtslage zu gelangen. Treten Umstände ein, die dieses Bestreben begünstigen, so bewegen sich die Moleküle in diesen Richtungen, und die Folge dieser Bewegungen ist eine unregelmäßige Veränderung der äußeren Form des gegebenen amorphen Körpers. In einem regelrecht krystallisierten Körper dagegen befinden sich alle Moleküle in der ihnen eigentümlichen Gleichgewichtslage gruppiert. Eine Spannung der Moleküle findet nicht statt, folglich liegt auch kein Bestreben vor, die Lage zu ändern. Die äußere Form eines krystallisierten Körpers ändert sich daher bei äußeren Einflüssen nie ungleichmäßig, sondern immer gleichmäßig, gleichviel ob die Ursache der Bewegung durch Temperatur oder durch Stöße hervorgerufen wird. Aus diesen Gründen können", hob Professor Kekulé hervor, „aus Metall angefertigte Normalmaße oder -gewichte nicht richtig bleiben, wohl aber solche Normale, die aus einem Krystall, z. B. Bergkrystall, hergestellt würden." Es ist jedoch von der Herstellung der Längenmaßprototype aus Bergkrystall seitens der Meterkommission zunächst deshalb Abstand genommen worden, weil hinreichend große homogene Stücke aus Bergkrystall bisher nicht aufgetrieben werden konnten, und weil es nicht ratsam schien, kleinere, etwa ein oder zwei Dezimeter lange Krystallstäbe als Prototype auszugeben wegen der sehr starken Fehlerhäufung, welche bei den Vergleichungen kürzerer Meßlängen mit bedeutend größeren Längen entstehen würde. In Bezug auf die theoretisch gefolgerte Unveränderlichkeit von Bergkrystallgewichten liegen bisher nur Vergleichungen von Bergkrystallgewichten unter einander vor, wobei, obschon deren Differenz stets unverändert gefunden wurde, dennoch die Möglichkeit von Änderungen beider Stücke in ganz gleicher Weise nicht ausgeschlossen ist.

Mit der Anfertigung der neuen metrischen Prototype war nun von der internationalen Meterkommission die französische Sektion betraut worden. Die Arbeiten der letzteren haben aber anfänglich den gewünschten Erfolg nicht erzielt. Die Ursache des Mißerfolgs war nach einem von Professor Wild der Petersburger Akademie erstatteten Berichte zum Teil in einigen für die damalige Zeit verfrühten und nicht ganz praktischen Beschlüssen der internationalen Meterkommission zu suchen, denen zufolge die neuen Prototype aus einer in ihren Eigenschaften damals noch nicht genügend erforschten Legierung von Platin-Iridium und zwar sämtliche Prototype aus einem einzigen Gußstücke von 250 kg hergestellt und die Stäbe eine eigentümliche, aus theoretischen Betrachtungen für zweckmäßig gefolgerte, praktisch aber schwer ausführbare Querschnittsform (angenähert die Form des X) erhalten sollten.

Bevor wir aber die Ergebnisse der inzwischen zum Abschlusse gelangten Untersuchungen der internationalen Meterkommission mitteilen, sei es gestattet, an dieser Stelle einen kurzen Blick auf die Geschichte der **Gradmessungen** zu werfen, deren eine ja, wie wir gesehen, durch die Bestimmungen der Toise von Peru für das Maßwesen der wissenschaftlichen Welt von Wichtigkeit geworden war.

Gradmessungen. Die ersten Versuche einer Bestimmung der Größenverhältnisse der Erde finden wir von den alten Ägyptern ausgeführt. Durch Pythagoras oder Aristoteles war die Kugelgestalt der Erde bewiesen, Eratosthenes von Kyrene versuchte sich in ihrer Größenbestimmung, und wenn diesem Weisen auch nicht das Verdienst zugesprochen werden kann, eine wirkliche Gradmessung, d. h. die Längenausmessung eines astronomisch genau bestimmten Teiles des Meridians, ausgeführt zu haben, so bleibt ihm doch der Ruhm, zur Ausmessung der Erde die richtige Methode gefunden und zuerst angewandt zu haben.

Die erste eigentliche Messung der Erde geschah im 9. Jahrhundert am Arabischen Meerbusen auf Befehl des Kalifen **Al-Mamum**. Die dieselbe ausführenden Geometer wurden in zwei Parteien geteilt, damit durch die Arbeit der einen die der anderen kontrolliert werden könne. Die für die Größe eines Grades — des 360. Teiles eines Kreises — gefundenen Werte wichen aber bedeutend von einander ab, indem die eine Expedition den Wert zu 46 arabischen Meilen, die andere dagegen zu 56,5 Meilen fand. Leider sind wir nicht im stande, zu entscheiden, wie nahe oder wie entfernt dem wahren Werte diese Angaben waren, da uns die genaue Kenntnis der Länge der arabischen Meile mangelt.

Von dieser Zeit an schienen derartige Untersuchungen durch das ganze Mittelalter hindurch zu ruhen. Das Interesse an den geographischen Wissenschaften war ein sehr geringes, und die allgemeine Wichtigkeit der Lösung solcher Fragen hatte man noch nicht erkannt. Erst 1525, nach der großen Erdumsegelung, gewann dieser Gegenstand wieder allgemeines Interesse.

Die nächste Gradmessung nach der arabischen in der Wüste Singar unternahm der auch als Mathematiker bekannte Leibarzt des Königs Heinrich II., **Fernel**. Als Resultat der auf primitivstem Wege ausgeführten Messung ergab sich für die Länge eines Meridiangrades der Wert von 57 070 Toisen, ein Ergebnis, welches fast genau mit den Messungen der neueren Zeit übereinstimmt, bei denen die Benutzung der vollkommensten Instrumente, die gewissenhafteste und scharfsinnigste Berücksichtigung der das Unternehmen beeinflussenden Verhältnisse einander hilfreich die Hand boten. Diese Übereinstimmung aber ist nichts weiter als ein Spiel des Zufalls. Denn Fernel hatte, um die Länge des Bogens zwischen Paris und Amiens, dessen Winkelgröße genau bekannt war, zu bestimmen, kein anderes Mittel angewandt, als einfach einen Wagen, in welchem er die zu messende Strecke durchfuhr; aus der Anzahl der Umdrehungen, die während dieser Zeit die Räder gemacht hatten, berechnete er die Länge des zurückgelegten Weges. Ein solches Verfahren kann auf Genauigkeit keinen Anspruch machen, und wenn das Resultat trotzdem ein der Wahrheit nahekommendes ist, so kommt dies eben nur daher, daß ein Fehler den anderen in seiner Wirkung aufhob.

Im Jahre 1615 führte der Geometer **Snellius** zwischen Alkmar und Bergen op Zoom in Holland eine Gradmessung aus. Der von ihm gemessene Bogen umfaßt 1° 11′ 30″, und der Wert für einen Grad wurde daraus zu 55 021 Toisen berechnet. Interessant ist diese Messung dadurch, daß bei ihr zuerst die Methode der Triangulation angewendet wurde, die eigentlich von Snellius erfunden worden ist.

Auf die andere, sehr mühsame Art, die Länge eines Bogenstückes durch Anwendung der Meßkette, also durch direkte Ausmessung zu finden, führte **Norwood** die schon erwähnte Messung 1635 zwischen London und York aus, bei der sich die Gradlänge zu 57 424 Toisen herausstellte. Einen davon sehr abweichenden Wert (62 650 Toisen) fand **Riccioli**, und die Französische Akademie, die hohe Wichtigkeit der Sache ins Auge fassend, beschloß nun, da bei den beträchtlichen Abweichungen, welche alle bisher auf diesem Gebiete ausgeführten Messungen noch unter einander zeigten, auf die wahrscheinlich richtige Größe nicht geschlossen werden konnte, eine neue Messung mit allen der Wissenschaft zu Gebote stehenden Mitteln in Angriff zu nehmen.

Der damals berühmte Geometer **Picard** wurde mit der Lösung dieser Aufgabe betraut. Er führte seine Arbeit im Jahre 1670 mit der größten Gewissenhaftigkeit durch, und seine Messung verdient vor allen andern das größte Zutrauen. Er maß zwischen Amiens und Malvoisine einen Bogen von 1° 28′ 28″ und berechnete daraus die Länge eines Meridiangrades zu 57 060 Toisen.

Unter Zugrundelegung dieser Angabe berechneten **Huyghens** und **Newton** die Größe der Erde, die man immer noch als vollkommene Kugel betrachtete. Als aber Richer die vorhin bereits erwähnte Beobachtung gemacht hatte, daß ein für Paris richtiges Sekundenpendel um 1,4 Pariser Linien verkürzt werden müsse, wenn seine Schwingungsdauer in Cayenne auch gerade eine Sekunde betragen solle, und ferner gefunden hatte, daß diese Längenkorrektion nicht etwa eine Folge der Wärmeausdehnung sei, stellte Newton die Behauptung auf, jene Veränderung der Schwingungsdauer des Pendels sei eine Folge der durch die Rotation der Erde erzeugten Zentrifugalkraft. Er folgerte ferner hieraus, daß sich um den Äquator, wo jene Zentrifugalkraft am größten sei, mehr Erdmasse angehäuft habe als an den Polen,

daß also die Erde nicht eine Kugel sei, sondern eine abgeplattete, ellipsoidische Gestalt haben müsse. Um die Frage zu entscheiden, wurde eine neue Gradmessung auf Anregung Picards durch die beiden Cassini: Dominique und Jakob, ausgeführt und der durch Paris gehende Meridian in seiner ganzen Länge in Frankreich gemessen. Dabei kam man aber auf das merkwürdige Ergebnis, daß die Grade nach den Polen zu abnehmen sollten. Man fand nämlich aus der von Paris bis an die südliche Grenze des Reiches ausgedehnten Messung (6° 18' 57") die Größe eines Grades zu 57 097 Toisen, dagegen aus der von Paris bis Dünkirchen 56 960 Toisen, woraus also gegen Newtons auf theoretische Gründe gestützte Behauptung hervorzugehen schien, daß die Länge der Erdachse — des die beiden Pole verbindenden Durchmessers — größer sei als die des Äquatorialdurchmessers der Erde.

Die Gelehrten aller Länder erhoben ihre Stimme, teils für die Newtonsche, teils für die Cassinische Gestalt der Erde. Um diesem mit vieler Heftigkeit unter den Mathematikern geführten Streite ein Ende zu machen, wurden von der französischen Regierung zwei Gradmessungen in hinlänglicher Entfernung von einander angeordnet. Die eine sollte unmittelbar unter dem Äquator, die andre unter dem Polarkreise vorgenommen werden.


221. Johann Jakob Baeyer.

Zuerst wurde (1735—46) die unter der Bezeichnung „Peruanische Messung" berühmte Unternehmung ausgeführt, und das ihr zu Grunde gelegte Maß — die Toise von Peru — wurde von da an das wissenschaftliche Grundmaß in allen kultivierten Ländern. Namen wie die der Geometer Bouguer und Condamine, des Botanikers Jussieu, denen sich unter anderen der berühmte spanische Gelehrte de Ulloa anschloß, sind für immer mit dieser denkwürdigen Expedition verknüpft.

Im Juni 1756 kam die zweite Expedition, bestehend aus den Akademikern Maupertuis, Clairaut, Camus und Lemonnier und dem Abbé Othier, im Bottnischen Meerbusen an und bestimmte noch in demselben Jahre die Größe eines Grades zu 57 434 Toisen. Aus einer Vergleichung dieses Wertes mit dem zwischen Paris und Amiens zu 57600 Toisen gefundenen und noch sicherer aus dem bei der peruanischen Messung gefundenen Werte zu 56 753 Toisen ergab sich ganz augenscheinlich, daß die Erde ein an den Polen abgeplattetes Sphäroid (also eine nur unvollkommene Kugel) sein muß, daß also der Cassinischen Messung keine Bedeutung zugeschrieben werden kann. Spätere Untersuchungen auf diesem Gebiete haben dies auch außer allen Zweifel gesetzt.

Von den vielen seitdem ausgeführten Gradmessungen sollen nur die wichtigsten hier kurz erwähnt werden. Es sind dies: die von Lacaille 1750 an der Südspitze von Afrika ausgeführte, durch welche die Zunahme der Breitengrade nach den Polen hin auch für die südliche Erdhalbkugel erwiesen wurden; die große von Delambre, Biot und Arago 1792 vollzogene, weil sie die Grundlage für das französische Metermaßsystem geworden ist; diejenige von Gauß in Hannover; die russische von Struve über 25 Breitengrade von Ismail an der Donau bis zum Nordkap sich erstreckende; die große ostindische, Ende der fünfziger Jahre, und die mitteleuropäische Gradmessung, welche 1861 nach einem Entwurf des Generalleutnants Dr. Johann Jakob Baeyer in Vorschlag gebracht wurde und an deren Ausführung sich die Staaten Baden, Bayern, Belgien, Dänemark, Frankreich, Hannover, Hessen-Kassel, Hessen-Darmstadt, Holland, Italien, Mecklenburg, Österreich, Preußen, Rußland, Sachsen, Sachsen-Koburg-Gotha, Schweden und Norwegen, die Schweiz und Württemberg beteiligten. Diese Gradmessung umfaßt einen Flächenraum von mehr als 53 000 Quadratmeilen, also etwa den dritten Teil des Flächeninhalts von Europa oder den 175. Teil der ganzen Erdoberfläche, und unterscheidet sich von den früheren Unternehmungen dieser Art dadurch, daß sie nicht sowohl bloß eine Messung in einem Meridian (Breitengradmessung) oder in einem Parallelkreis (Längengradmessung) sein soll, sondern eine Verbindung beider, welche die vollständige Bestimmung der Krümmungsverhältnisse von einem beträchtlichen Teile Europas mit allen besonderen lokalen Abweichungen von der regelmäßigen Figur und die Ermittelung der Ursachen dieser Abweichungen erstrebt.

Das Metermaßsystem. Bei der Gradmessung vom Jahre 1792 wurde ein Bogen von 12° 22′ 13″ gemessen, von Dünkirchen bis zur Insel Formentera, der Wert eines Grades aus dieser ganzen Länge von 705 189 Toisen berechnet und daraus die Länge des Meridianbogens vom Pol bis zum Äquator abgeleitet. Der zehnmillionte Teil dieses Quadranten sollte als Maßeinheit angenommen werden. Da aber aus den durch die Gradmessung erhaltenen Resultaten die Länge des Meter — eben jenes zehnmillionten Teiles des Erdquadranten — sich verschieden ergab, je nachdem man für die Größe der Erdabplattung an den Polen verschiedene Werte annahm, so bestimmte ein Dekret vom 19. Frimaire des Jahres 8, daß das gesetzliche Meter der Entfernung der Endflächen einer Metallstange gleichzusetzen sei, welche bei 0° C. auf der bei 16,25° C. bestimmten Toise von Peru 443,296 Linien der letzteren mißt. Diese Länge sollte, da die verschiedenen Ansichten über die wahre Größe des gesuchten Wertes voraussichtlich noch nicht sobald zu einer Einigung zu gelangen schienen, und man die wichtige Frage der Festsetzung eines einheitlichen Maßes nicht in das Ungewisse hinaus vertagen wollte, als mit dem zehnmillionten Teil der wahrscheinlichen Länge des Erdquadranten übereinstimmend angenommen werden unter dem Namen Meter.

Die Einteilung geschah nach dem Dezimalsystem. Die Bezeichnungen wurden zwei toten Sprachen, der griechischen und der lateinischen, entnommen, indem man von dem Gesichtspunkte ausging, daß alle heutigen Kulturvölker eine gleiche Pietät für die Sprachen jener Völker hegen, welche unsere Bildung begründet haben. Man befolgte dabei die Methode, die Bezeichnungen von Vielfachen der Maßeinheit der griechischen, die der Unterabteilungen der lateinischen Sprache zu entlehnen.

Die Längeneinheit selbst nannte man, wie schon erwähnt, kurzweg Meter (von dem griechischen Worte μέτρον, der Messer); die Unterabteilungen: Dezimeter = 0,1 m; cm = 0,01 m; mm = 0,001 m; die Vielfachen dagegen: Dekameter = 10 m; Hektometer = 100 m; Kilometer = 1000 m; Myriameter = 10 000 m. Die ersteren wurden durch Zusammensetzung mit den lateinischen Wörtern decem zehn, centum hundert, mille tausend, die letzteren mit den gleichbedeutenden griechischen Wörtern gebildet: δέκα (deka) zehn, ἑκατόν (hekaton) hundert, χίλιοι (chilioi) tausend, und μύριοι (myrioi) zehntausend.

Als Gewichtseinheit wurde das Gewicht eines Würfels reinen destillierten Wassers von 4° C. festgesetzt, dessen Seitenlänge 1 Dezimeter betragen sollte. Man nannte sie Kilogramm, nach dem griechischen γράμμα (gramma); das Kilogramm entspricht einem Gewicht von 2 Zollpfund und wurde eingeteilt in 1000 Gramm, das Gramm in 10 Dezigramm, das Dezigramm in 10 Zentigramm und das Zentigramm in 10 Milligramm. Flächen- und Körpermaße wurden direkt von den Längenmaßen durch Quadrieren und Kubieren derselben abgeleitet, und als Einheit der ersteren erhielt die Flächengröße von 100 qm, also ein Quadrat von 10 m Seitenlänge, den Namen Are (von arare, pflügen), als Einheit der letzteren dagegen ein Würfel von 1 m Seitenlänge den Namen Stere (von στερεός [stereos] = fest, solid). Den Volumeninhalt eines Kubikdezimeter nannte man Liter (von λίτρα [litra] soviel als das lateinische libra, ein Pfund oder was ein Pfund wiegt); Aren, Steren und Liter aber, ebenso wie die Meter, wurden in Dezi-, Zenti-, Deka-, Hekto-Steren, -Aren und -Liter weiter gruppiert und geteilt.

Man ersieht daraus, daß in dem Metermaßsystem durchaus nichts enthalten ist, was spezifisch französisch und aus diesem Grunde einer internationalen Einrichtung hinderlich gewesen wäre. Trotz alledem wurden nicht ganz unwesentliche Einwendungen gegen seine allgemeine Einführung erhoben. Das eine Mal wurde gesagt: es sei zur Bestimmung des Meters der Meridian, welcher durch Paris gehe, gemessen und seine Länge zur Grundlage genommen worden, das Meter demnach doch eine rein französische Größe; das andere Mal wurde darauf Bezug genommen, daß das Meter nach den neueren und immer mehr vervollkommneten Messungen der Erde jetzt nicht mehr der zehnmillionte Teil der Länge des Erdquadranten sei, wie es anfänglich sein sollte, sondern daß in Wahrheit das Viertel eines Meridiankreises 10 000 857,5 m betrage, das Meter demnach falsch sei.

Der eine Einwand ist so haltlos wie der andere. Welchen größten Kreis ich auf einer Kugel messe, bleibt für die Bestimmung ihrer Dimensionen ganz gleich, wenn nur überhaupt ein Kreis oder das Stück eines solchen gemessen wird, der durch die beiden Endpunkte eines Durchmessers, aber gleichviel welchen Durchmessers, gelegt ist. Für ein Rotationssphäroid, wie unsere Erde, gilt nun zwar diese Allgemeinheit nicht, da wir hier unendlich viele verschieden lange Durchmesser haben, einen längsten, der je zwei gegenüberliegende Punkte des Äquators, und einen kürzesten, der die beiden Pole mit einander verbindet. Zwischen beiden liegen Durchmesser von allen innerhalb dieser Grenzen nur möglichen Werten. Alle Meridiane aber sind gleich lang — der Pariser Meridian ist ebenso lang wie der von Potsdam, man kann also in diesem Sinne den einen nicht als bevorzugt ansehen. Zudem ist zu bedenken, daß zur Bestimmung des Erdquadranten, dessen zehnmillionten Teil man als Meter annahm, alle früheren Gradmessungen mit berücksichtigt wurden, und alle diejenigen Länder, welche für die wissenschaftliche Erforschung der Erde in dieser Richtung etwas gethan hatten, auch die Ehre in Anspruch nehmen dürfen, für die Bestimmung der Einheit des Metermaßsystems das Material geliefert zu haben.

Was den zweiten, oft als besonders wichtig hingestellten Einwand betrifft, daß das Meter falsch sei, weil es nicht mehr den zehnmillionten Teil des Erdquadranten betrage, so haben zwar die immer schärfer werdenden Untersuchungen ergeben, daß die früheren Bestimmungen der Größe der Erde an Ungenauigkeiten litten; solange man aber in der Vervollkommnung der Instrumente und der Meßmethoden fortschreitet, so lange wird man die zur Zeit für richtig gehaltenen Maßangaben noch mit Fehlern behaftet finden, die aber in immer enger werdenden Grenzen sich bewegen. Der Umfang der Erde ist nach unserer jetzigen Kenntnis größer, als man 1792 dachte; hätte man darauf bestanden, daß das Meter unter allen Verhältnissen den zehnmillionten Teil des Erdquadranten darstellen sollte, der Erdquadrant also die Einheit, so würde dasselbe allerdings jetzt nicht mehr richtig, sondern zu kurz sein. Eine solche Bedingung liegt aber dem Metermaß durchaus nicht zu Grunde. Es kommt bei ihm wie bei jedem natürlichen Maße nicht darauf an, daß das Verhältnis seiner Einheit zu einer unveränderlichen Dimension der Natur gerade durch eine runde Zahl, wie 1 : 10 000 000, ausgedrückt wird, sondern nur darauf, daß dieses Verhältnis möglichst richtig erkannt und die richtige Verhältniszahl beibehalten werde. Endlich hat man auch noch den Einwurf erhoben, daß eine krumme Linie (der Umfang der Erde) nicht das Mittel zur Messung von Längen, d. h. geraden Linien abgeben könne. Dem ist aber entgegenzuhalten, daß jede krumme Linie, sobald ihre Länge bestimmt und ausgedrückt wird, schon in eine gerade Linie verwandelt ist, ja daß man nicht anders zur Kenntnis der Länge eines Meridians kommen kann, als daß man die krumme Linie selbst durch Aneinanderlegen gerader Längenmaße ausmißt.

Da nun vom wissenschaftlichen Standpunkte aus gegen das Metersystem nichts einzuwenden ist, die Praxis aber längst entschieden hat, daß es allen Ansprüchen an Bequemlichkeit genügt, so dürfen wir hoffen, daß darin ein Weltmaß geschaffen sei, welches alle Staaten allmählich anzunehmen für gut finden werden.

Die umfangreichen Untersuchungen des Internationalen Bureaus, welche sich auf die Herstellung und Festsetzung der internationalen Urnormale und auf die Ausgabe der nationalen Prototype bezogen, sind vor einiger Zeit zum Abschluß gelangt, und es sind an Stelle der bisherigen französischen metrischen Prototype, welche fortan nur als historische Erinnerungsstücke erhalten bleiben sollen, von der im September 1889 in Paris zusammengetretenen „Generalkonferenz für Maß und Gewicht“ die mit jenen vollkommen identischen, neuen internationalen Prototype als Einheiten sanktioniert und in dem Internationalen Bureau niedergelegt worden. Gleichzeitig sind die erforderliche Anzahl gleichartiger, für die einzelnen Staaten hergestellter Kopieen, die sogenannten nationalen Prototype, als legale Vertreter der internationalen Prototype sanktioniert und ihre Beziehungen zu den internationalen Prototypen festgestellt worden.

Demgemäß wird fortan die Längeneinheit, das Meter, dargestellt durch den Abstand, welcher bei der Temperatur des schmelzenden Eises zwischen den Mitten der Endstriche

eines von Johnson, Matthey & Co. zu London hergestellten Maßstabes aus Platin-Iridium stattfindet, welcher die Bezeichnung M führt, und dessen X-förmiger Querschnitt durch Abb. 222 in natürlicher Größe veranschaulicht wird. Die Striche befinden sich in der neutralen, nach der Festigkeitslehre verzerrungsfreien, in der Zeichnung durch die Linie a b angedeuteten Ebene des Stabes.

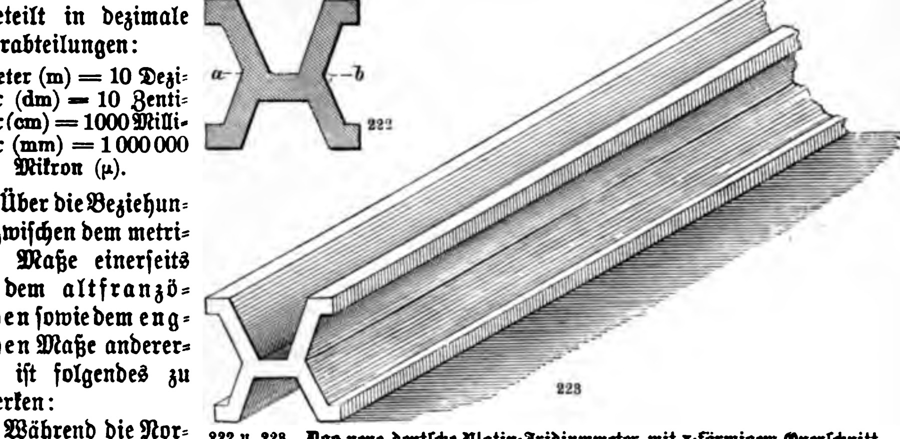
Das dem Deutschen Reiche von der Generalkonferenz durchs Los zuerteilte und fortan im Gewahrsam der Kaiserlichen Normal-Aichungs-Kommission zu Berlin befindliche Meterurmaß Nr. 18 ist ein Platin-Iridium-Maßstab von X-förmigem Querschnitt, dessen Länge durch den Abstand der Mitten der in der neutralen Ebene des Stabes befindlichen Endstriche dargestellt und durch die Gleichung gegeben ist:

$$\text{Urmaß Nr. } 18 = 1 \text{ m} - 1{,}0\ \mu + \alpha T,$$

wo μ = Mikron das Tausendstel des Millimeter, T die Temperatur nach der für den internationalen Dienst für Maß und Gewicht angenommenen Normalskala (Skala des Wasserstoffthermometers) bedeutet, und $\alpha = 0{,}0000086$ der lineare Ausdehnungskoeffizient des Urmaßes Nr. 18 zwischen den Temperaturen 0° und T° ist. Abb. 222 u. 223 stellen das neue deutsche Urmeter Nr. 18 dar.

Das Meter wird eingeteilt in dezimale Unterabteilungen:

1 Meter (m) = 10 Dezimeter (dm) = 10 Zentimeter (cm) = 1000 Millimeter (mm) = 1 000 000 Mikron (μ).



222 u. 223. Das neue deutsche Platin-Iridiummeter mit x-förmigem Querschnitt.

Über die Beziehungen zwischen dem metrischen Maße einerseits und dem altfranzösischen sowie dem englischen Maße andererseits ist folgendes zu bemerken:

Während die Normaltemperatur für das metrische Maß die Temperatur des schmelzenden Eises, 0° C., ist, liegt die Normaltemperatur des altfranzösischen Maßes bei 13° R. oder bei 16,25° C. Um beide mit einander zu vergleichen, muß man daher die Länge des ersteren bei 0°, die Länge des letzteren bei 16,25° C. in Betracht ziehen. Alsdann finden folgende Beziehungen zwischen dem metrischen und dem altfranzösischen Maß statt:

1 m = 3 Fuß 11,296 Linien altfranz.
oder = 443,296 „ „
1 cm = 4,43296 „ „
1 mm = 0,443296 „ „

und umgekehrt
1 altfranz. Fuß = 324,83938 mm,
1 „ Zoll = 27,06995 „
1 „ Linie = 2,25583 „

Die Normaltemperatur der englischen Einheit des Längenmaßes, des Yard, ist 62° F. (16²/₃° C.). Um daher das Verhältnis des Yard zum Meter zu ermitteln, muß man die Länge des ersteren bei 62° F. mit der des letzteren bei 0° C. vergleichen. Alsdann ist

1 m = 1 Yard 3,37079 Inches = 39,37079 engl Zoll,

und umgekehrt

1 Yard = 914,38348 mm

Neben dem Yardmaße ist im Handelsverkehr Englands auch der Gebrauch des Meter gestattet, mit der Maßgabe, daß die Vergleichungen des Yard mit dem Meter,

ohne Rücksicht auf die metrische Normaltemperatur, bei 62° F. vorgenommen werden. Unter dieser Voraussetzung ist

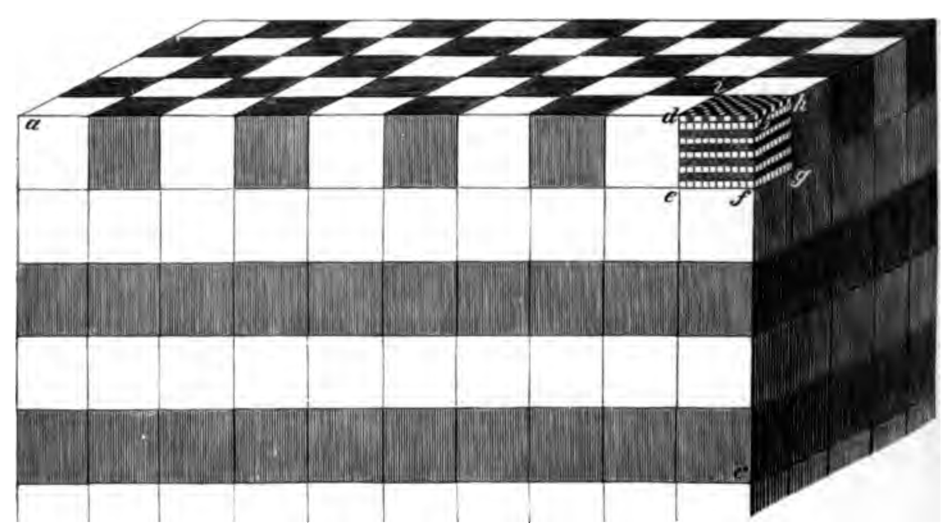
1 Meter im Handel = 39,38208 engl. Zoll,
und umgekehrt 1 Yard = 914,12 mm des Handelsmaßes.

Zur Vergleichung des Metersystems mit anderen früher gebräuchlichen Maßen sei hier mitgeteilt, daß:

1 m = 3,186 rheinische = 3,531 sächsische Fuß,
1 Quadratmeter (qm) = 10,152 rheinische = 12,469 sächsische Quadratfuß,
1 Kubikmeter (cbm) = 32,346 rheinische = 44,032 sächsische Kubikfuß ist.

Ferner ist:

1 Ar (a) = 100 qm,
1 Hektar (ha) = 100 Ar = 2,471 engl. Acres = 3,917 preuß. Acker (zu 100 Quadratruten) = 1,807 sächs. Acker (zu 300 Quadratruten).



224. Zur Veranschaulichung des Metermaßsystems: Teil eines Dezimeterwürfels mit seinen Untergrößen.

In Abb. 224 haben wir ein Schema abgedruckt, welches die Verhältnisse des Metermaßsystems zur Anschauung bringt. Die Seite a b des würfelförmigen Körpers ist = 1 dm, seine Höhe b c = 5 cm, so daß jede Seite der einzelnen Felder = 1 cm ist. Jedes solches Feld ist 1 qcm, und der entsprechende Würfel, z. B. b d e f g h i 1 ccm. Man erkennt die Einteilung des dm in 10 cm natürlicher Größe und ebenso die Einteilung eines cm, z. B. b d, in 10 mm natürlicher Größe; endlich die Einteilung eines qcm in 100 qmm und eines ccm in 1000 cmm.

Einheit der Masse. Die Materie oder die Masse eines Körpers messen wir durch sein Gewicht. Eigentlich ist das Gewicht eines Körpers, d. h. die Kraft, mit welcher der Körper von der Erde angezogen wird, keine unveränderliche Größe, da es abhängt von dem Orte der Erdoberfläche, an dem sich der Körper befindet. Das einzig Unveränderliche ist die Quantität der in dem Körper enthaltenen Materie oder seine Masse. Eine Wägung hat eigentlich nur den Zweck der Massenbestimmung. In der Praxis, im Handel ist es uns beim Wägen eines Körpers nicht etwa darum zu thun, schlechthin sein Gewicht zu bestimmen, d. h. die Kraft, mit der er von der Erde angezogen wird, oder den Druck, den er auf seine Unterlage ausübt, oder sein Bestreben, zur Erde zu fallen, sondern darum, die Quantität der in ihm enthaltenen Materie zu bestimmen, und wir haben uns also unter Gewicht eines Körpers stets die in ihm enthaltene Quantität der Materie vorzustellen, wie sie durch den Wägungsprozeß durch Vergleichung mit Normalgewichten bestimmt wird.

Die historische Entwickelung und Begründung der Gewichtseinheit hat nahezu denselben Verlauf wie die der Längeneinheit genommen, da die Einheit des Gewichts auf das innigste mit der Längeneinheit zusammenhängt. Wir können uns daher hier kürzer fassen. Bei der Festsetzung der Gewichtseinheit steht uns aber die Wahl der Größe und die Wahl der Substanz frei, welche der Messung zu Grunde gelegt werden soll. Man ist allgemein übereingekommen, reines destilliertes Wasser im Maximum seiner Dichtigkeit, also bei 4° C., als Substanz zu wählen und als Einheit des Gewichts festzusetzen das Gewicht eines Kubikdezimeter oder eines Liter reinen destillierten Wassers im Maximum seiner Dichtigkeit. Dieses Gewicht heißt ein Kilogramm. Das Prototyp desselben ist ein von Fortin in Paris angefertigter Cylinder aus Platin, welcher bei 0° C. und auf den luftleeren Raum reduziert so viel wiegen soll, wie ein Liter reinen destillierten Wassers im Maximum der Dichtigkeit reduziert auf den luftleeren Raum. Dasselbe wird ebenso wie das Prototyp des Meter in dem Conservatoire des arts et métiers zu Paris unter dem Namen „Kilogramme des Archives“ aufbewahrt. Ebenso wenig wie die durch das „Mètre des Archives“ dargestellte Längeneinheit im strengen Sinne eine natürliche ist, da sie, wie bereits erwähnt, ein gesetzlich definierter Teil der Toise du Pérou ist und nur annäherungsweise dem zehnmillionten Teil des Erdquadranten entspricht, so ist auch die durch das „Kilogramme des Archives“ dargestellte Gewichtseinheit streng genommen keine natürliche. Das Kilogramm stellt nur annäherungsweise das Gewicht eines Liter reinen destillierten Wassers bei 4° C. dar. Die Bestimmung der Dichtigkeit des Wassers ist nämlich mit den größten experimentellen Schwierigkeiten verknüpft; die von den sorgfältigsten Beobachtern erhaltenen Resultate weichen von einander um Größen ab, welche die bei Wägungen auftretenden Fehler bei weitem überschreiten; neuere Bestimmungen mit vollkommeneren Hilfsmitteln und Einrichtungen, wie sie von der internationalen Meterkommission in Aussicht und auch bereits in Angriff genommen sind, können daher ein anderes Resultat für das Gewicht eines Liter reinen destillierten Wassers ergeben. Aus diesem Grunde ist also auch die durch das „Kilogramme des Archives“ repräsentierte Gewichtseinheit eigentlich als eine konventionelle anzusehen, von welcher die in den verschiedenen Staaten gebräuchlichen Kilogramme Kopieen sind. So ist durch das bereits erwähnte Gesetz vom 17. August 1868 bei uns als Urgewicht das im Besitze der Königl. Preußischen Regierung, jetzt im Gewahrsam der Kaiserlichen Normal-Aichungs-Kommission befindliche Platin-Kilogramm festgesetzt, welches mit Nr. 1 bezeichnet, im Jahre 1860 durch eine von der preußischen und der französischen Regierung niedergesetzte Kommission mit dem „Kilogramme prototype des Archives“ verglichen und gleich 0,999999842 Kilogramm befunden worden ist. Das Kilogramm wird eingeteilt in 1000 Gramm mit dezimalen Unterabteilungen. 1 Kilogramm (kg) = 1000 Gramm (g) = 10000 Dezigramm (dg) = 100 000 Zentigramm (cg) = 1 000 000 Milligramm (mg).

Für die Masse von 100 kg hat der deutsche Bundesrat im Anfang des Jahres 1897 die Benennung Doppelzentner und die Abkürzung „dz“ festgesetzt. Damit ist für diese dem Verkehr unentbehrliche Größe Einheitlichkeit herbeigeführt, und der bisher gebräuchliche Ausdruck „metrischer Zentner“ wird bald verschwinden.

Bei der nunmehr vollzogenen Festsetzung des neuen internationalen Urgewichts hat das internationale Maß- und Gewichtskomitee und auf seinen Antrag die erste allgemeine Konferenz des internationalen Maß- und Gewichtsdienstes in Übereinstimmung mit den obigen Erwägungen ausdrücklich erklärt:

Das internationale Kilogramm stellt die Einheit der Masse dar.

An Stelle des „Kilogramme des Archives“ gilt fortan als Prototyp der Masseneinheit das neue internationale Urgewicht, das Kilogramm K, ein von Johnson, Matthey & Co. zu London aus einer Legierung von 90% Platin mit 10% Iridium hergestellter Cylinder von einer dem Durchmesser seines kreisförmigen Querschnitts gleichen Höhe, welcher im Jahre 1880 mit dem „Kilogramme des Archives“ verglichen und innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler mit letzterem identisch befunden worden ist.

Das dem Deutschen Reiche von der Generalkonferenz durch das Los zugeteilte Urgewicht Nr. 22 ist ein von Johnson, Matthey & Co. zu London aus einer Legierung von Platin mit 10% Iridium verfertigter gerader Cylinder, dessen Höhe (39 mm) gleich dem Durchmesser seines kreisförmigen Querschnitts ist, und dessen Masse durch die Gleichung dargestellt wird:

Urgewicht Nr. 22 = 1 kg + 0,068 mg ± 0,002 mg.

das Volumen des Urgewichts Nr. 22 bei 0° C. beträgt 46,403 ml (ml = Milliliter = Kubikzentimeter).

Abb. 225 stellt das neue deutsche Kilogramm Nr. 22 dar. 1 kg = 2,043 Pariser Pfund = 2,205 englische = 2 preußische, sächsische u. s. w. (Zollpfund).

Einheit der Zeit. Die Zeit bietet das vorzüglichste Beispiel für eine kontinuierlich gleichförmig wachsende Größe, für einen kontinuierlich gleichförmigen Fortgang. Für die Zeitmessung ist daher schon von den Kulturvölkern des Altertums das Grundmaß hergeleitet worden aus der Beobachtung der großartigsten nahezu gleichförmigen Bewegung, die wir kennen, nämlich der scheinbaren täglichen Umdrehung des Himmelsgewölbes oder der täglichen Umdrehung der Erde um ihre Achse. Die Dauer des wahren Sonnentages, d. h. die Zeit, welche zwischen zwei auf einander folgenden Durchgängen des Sonnenmittelpunktes durch den Meridian des Beobachtungsortes verfließt, ist zwar, weil die Erde selbst sich mit ungleichförmiger Geschwindigkeit um die Sonne bewegt, und weil die Rotationsachse der Erde gegen die Erdbahn geneigt ist, keine unveränderliche Größe: sie ändert sich vielmehr innerhalb eines Jahres periodisch, erreicht ihr Maximum zur Zeit der Sommersonnenwende am 17. September. Da nun aber dieselben Tageslängen periodisch wiederkehren, so hat man der Zeitrechnung den Begriff des mittleren Sonnentages zu Grunde gelegt, d. h. der Durchschnittslänge, die sich als Mittel aus allen wahren Sonnentagen innerhalb eines Jahres ergibt. In der Astronomie legt man der Zeitmessung eine andere, ebenfalls aus der scheinbaren täglichen Umdrehung des Himmelsgewölbes abgeleitete unveränderliche Größe zu Grunde, nämlich den Sterntag, d. i. das Zeitintervall zwischen zwei auf einander folgenden Durchgängen eines und desselben Fixsterns durch den Meridian des Beobachtungsortes; im gewöhnlichen Leben aber und bei allen physikalischen Untersuchungen rechnet man nach mittlerer Sonnenzeit. Die Abweichung der mittleren von der wahren Sonnenzeit nennt man die Zeitgleichung, und man kann diese für jeden Tag aus jedem Kalender entnehmen. Man teilt nun bekanntlich den Tag in 24 Stunden, die Stunde in 60 Minuten, die Minute in 60 Sekunden. Diese Einteilung war und ist allgemein, nur zur Zeit der großen französischen Revolution, als man die Dezimalteilung vollständig und systematisch durchzuführen beabsichtigte, machte man den mißlungenen Versuch, den Tag in 10 Stunden, die Stunde in 100 Minuten, die Minute in 100 Sekunden zu teilen. Als unveränderliche Einheit für das Zeitmaß gilt heute für alle zivilisierten Völker der Erde die Sexagesimalsekunde der mittleren Sonnenzeit, oder wie sie schlechtweg genannt wird, die bürgerliche Zeitsekunde.


225. Das neue Platin-Iridium-Kilogramm.

Diese drei Grundeinheiten des Raumes, der Masse und der Zeit bilden das sogenannte absolute Maßsystem.

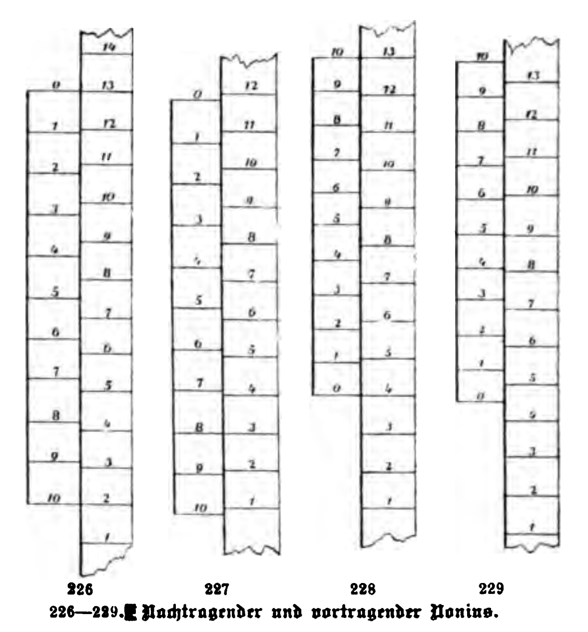
Unser jetziges Münzsystem besitzt auch Dezimalteilung und ermöglicht dadurch, Rechnungsoperationen auf bequeme und einfache Weise auszuführen.

Weitergehend muß man auch dem Wunsche nach Einführung eines Universal-Münzsystemes Raum geben. Dies wird aber wohl noch für unabsehbare Zeit infolge nationaler Eitelkeit und Eifersucht der verschiedenen Nationen ein frommer Wunsch bleiben, so allgemein anerkannt auch die Vorteile sind, welche der Menschheit durch Einführung eines einzigen Münzsystems erwachsen würden.

Instrumente und Apparate zur Messung der drei Fundamentaleinheiten.

Längenmeßapparate.

Längen werden miteinander verglichen durch Maßstäbe; man unterscheidet Strichmaßstäbe (étalons à traits), bei denen die Länge durch Punkte oder Parallelstriche an der Oberfläche markiert ist, und Endmaßstäbe (étalons à bouts), bei denen die Länge durch die in der Regel aus Edelstein, Rubin, Saphir, Diamant u. s. w. gebildeten Mitten der begrenzenden Endflächen bestimmt sind. Die neuen internationalen und nationalen Platin-Iridium-Maßstäbe (Prototype) sind Strichmaßstäbe. Da im allgemeinen die Substanzen sich mit der Temperatur ausdehnen, so wird die durch einen Maßstab der einen oder anderen Art angegebene nominelle Länge nur für eine ganz bestimmte Temperatur die wahre Länge sein. Für das metrische System ist als Normaltemperatur die des schmelzenden Eises, 0° C., angenommen worden. Die Länge eines Maßstabes wird daher erst bestimmt sein, wenn man seine wahre Länge bei der Normaltemperatur, seinen Wärme-Ausdehnungskoeffizienten und die Temperatur kennt, bei welcher die Messung erfolgt.



226—229. Nachtragender und vortragender Nonius.

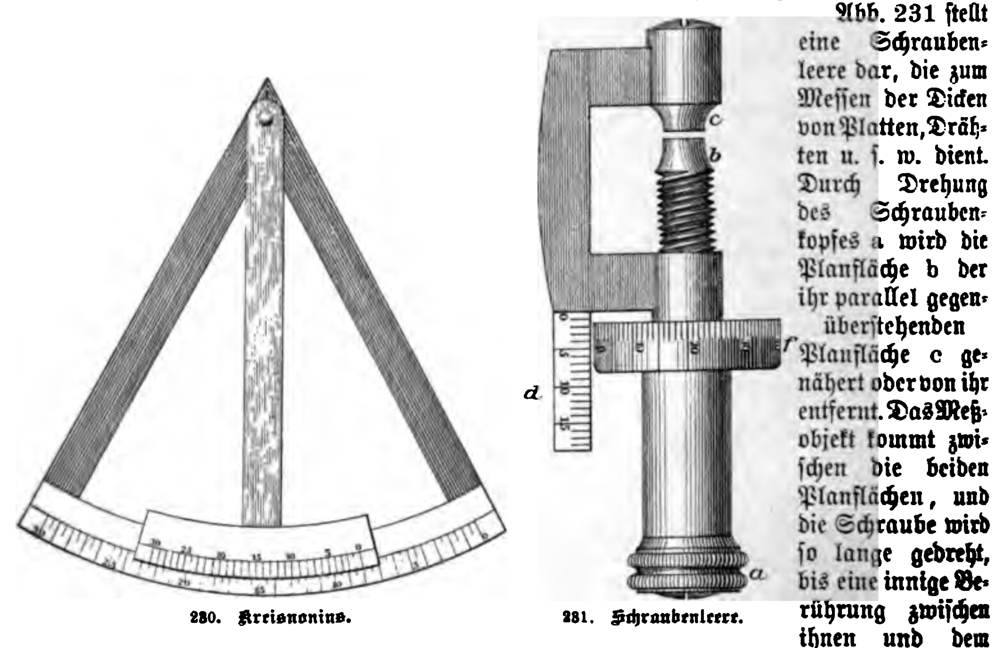
Betrachten wir nun die wichtigsten bei der Längenmessung in Anwendung kommenden Instrumente und Apparate. Da ist zunächst für Messung kleinerer Längen der Nonius oder Vernier,*) der aus einem parallel mit der Länge des Maßstabes zu verschiebenden Schlitten besteht und so geteilt ist, daß allgemein n Teile des Nonius auf n + 1 oder n — 1 Teile des Maßstabes gehen. In Abb. 226 u. 227 gehen 10 Teile des Nonius auf 11 Teile des Maßstabes (nachtragender oder absteigender Nonius), in Abb. 228 und 229 10 Teile des Nonius auf 9 Teile des Maßstabes (vortragender oder aufsteigender Nonius). Im ersten Falle ist jeder Noniusteil um $^1/_{10}$ größer, im zweiten um $^1/_{10}$ kleiner als ein Teil des Maßstabes. Fällt ein Teilstrich des Nonius mit einem des Maßstabes zusammen, so sind demnach die folgenden Teilstriche des Nonius gegen die entsprechenden Teilstriche des Maßstabes um $^1/_{10}$, $^2/_{10}$ u. s. w. voraus resp. zurück, und die Ziffer des mit einem Teilstrich des Maßstabes zusammenfallenden Noniusteilstriches zeigt an, um wieviel Zehntel der Nullpunkt des Nonius über den letzten Teilstrich des Maßstabes hinausliegt. Demgemäß ergibt die Noniusstellung (Abb. 227) die Ablesung 11,8, die Einstellung (Abb. 229) die Ablesung 4,5 Intervalle des Maßstabes. Man nennt allgemein den reziproken Wert der Zahl der Noniusteilstriche, $^1/_n$, die „Angabe" des Nonius.

Das Prinzip des Nonius wird auch zur Messung kleiner Unterabteilungen von Kreisteilungen angewandt. Ein solcher Nonius besteht aus einem konzentrisch zum Teil-

*) Man leitet die Bezeichnung Nonius mit Unrecht von dem um die Nautik verdienten portugiesischen Mathematiker Pedro Nuñez oder Nunnius (1492—1577) ab, denn seine 1542 beschriebene Vorrichtung zum Messen kleiner Bogenteile entspricht nicht der gebräuchlichen Noniuseinrichtung. Die Bezeichnung Vernier stammt von dem Niederländer Pierre Vernier (1580—1637), der das Prinzip des noch heute angewendeten Nonius in „La construction, l'usage et les propriétés du cadran de mathématique" (Brüssel 1631) beschrieben hat.

kreis beweglichen Sektor, welcher wieder so geteilt ist, daß n seiner Intervalle auf $n + 1$ oder $n - 1$ Intervalle des Kreises gehen (Abb. 230).

Ein zweites Meßinstrument ist die **Mikrometerschraube**. Dies ist eine sehr fein geschnittene Schraube, welche an dem einen Ende mit einer geteilten Trommel versehen ist, durch deren Umdrehungen in der Regel entweder ein Schlittenapparat unter einem feststehenden, mit Fadenkreuz und Okularmikrometer versehenen Mikroskope oder ein solches über einer festen Unterlage fortbewegt wird. Bei Messungen mittels der Mikrometerschraube setzt man voraus, daß die Größe der durch ihre Umdrehungen bewirkten linearen Verschiebung proportional ist der an der Trommel abzulesenden Anzahl der Umdrehungen oder der Bruchteile derselben, — eine Voraussetzung, die niemals streng erfüllt ist, und welcher daher bei Präzisionsmessungen stets Rechnung getragen werden muß durch Bestimmung sowohl der Schrauben- oder Ganghöhe an verschiedenen Stellen der Schraube, als auch der unter dem Namen der „periodischen Fehler der Schraube“ bekannten Ungleichheiten innerhalb eines und desselben Schraubenganges.



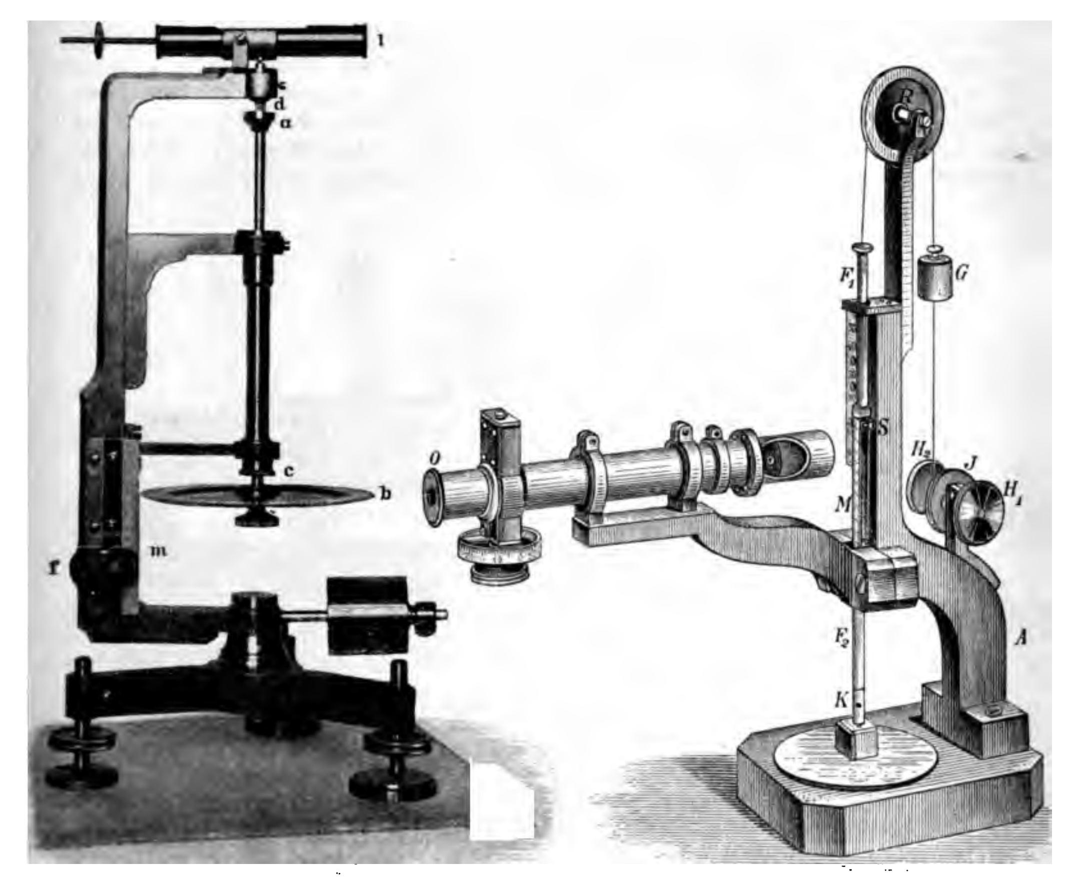
230. Kreisnonius. 281. Schraubenleere.

Abb. 231 stellt eine Schraubenleere dar, die zum Messen der Dicken von Platten, Drähten u. s. w. dient. Durch Drehung des Schraubenkopfes a wird die Planfläche b der ihr parallel gegenüberstehenden Planfläche c genähert oder von ihr entfernt. Das Meßobjekt kommt zwischen die beiden Planflächen, und die Schraube wird so lange gedreht, bis eine innige Berührung zwischen ihnen und dem Meßobjekt stattfindet. Die ganzen Umdrehungen (in Millimeter) werden an der Skala d, Bruchteile derselben (Hundertstel Millimeter) an der Trommel f abgelesen.

Ein feinerer Apparat zur Messung kleinerer Dicken ist das **Libellensphärometer** (Abb. 232). Eine ebene, polierte zur Aufnahme der Meßobjekte dienende Stahlplatte a wird durch eine lange, feine mit Teilkreis b versehene Mikrometerschraube c in vertikaler Richtung längs eines Millimetermaßstabes m gegen eine zweite ihr parallele Platte oder Schneide d geführt. Letztere wirkt mittels eines Führungsstiftes gegen eine sehr empfindliche, exzentrisch gelagerte Libelle, welche einmal bei Berührung der beiden Planflächen allein, das andere Mal bei Zwischenschalten des Meßobjektes zur Horizontierung gebracht werden muß. Der Vertikalmaßstab, an welchem die Ablesung mittels der Lupe f erfolgt, besitzt Millimeterteilung; der in 500 Teile geteilte Teilkreis wird durch eine Umdrehung um $^1/_2$ mm fortbewegt, so daß 1 Pars des Teilkreises gleich $^1/_{1000}$ mm ist.

Zur Dickenmessung bestimmt ist auch das **Abbésche Kontaktmikrometer** (Abb. 233). Seine Konstruktion beruht auf dem Prinzip, daß die zu messende Strecke die geradlinige Fortsetzung der als Maßstab dienenden Längenteilung bildet und direkt mit einer Längenteilung verglichen wird. Der auf die Bodenplatte des Apparates aufgeschraubte Arm A dient als Träger einerseits für das in horizontaler Lage angebrachte Mikrometermikro-

skop, andererseits zur Befestigung der Hebe- und Senkvorrichtung J des vertikal herabhängenden Maßstabes M. Eine feingeteilte Platinlamelle ist zwischen zwei Spitzen S aufgehängt in geradliniger Fortsetzung eines oberen und eines unteren stählernen Führungscylinders F_1 und F_2. Der letztere trägt an seinem unteren Ende einen Kontaktstift K mit sphärisch geschliffener Endfläche aus Achat. Zum Heben und Senken der Führungscylinder und des Maßstabes dient eine aus Schnur, Rolle R und zwei Handhaben H_1 und H_2 bestehende Vorrichtung. Die Führungscylinder nebst Maßstab sind durch ein Gegengewicht G bis auf einen kleinen Rest so äquilibriert, daß, wenn man sie sorgfältig herabläßt, die Kontaktfläche stets mit einem sehr kleinen, aber in allen Fällen gleichen

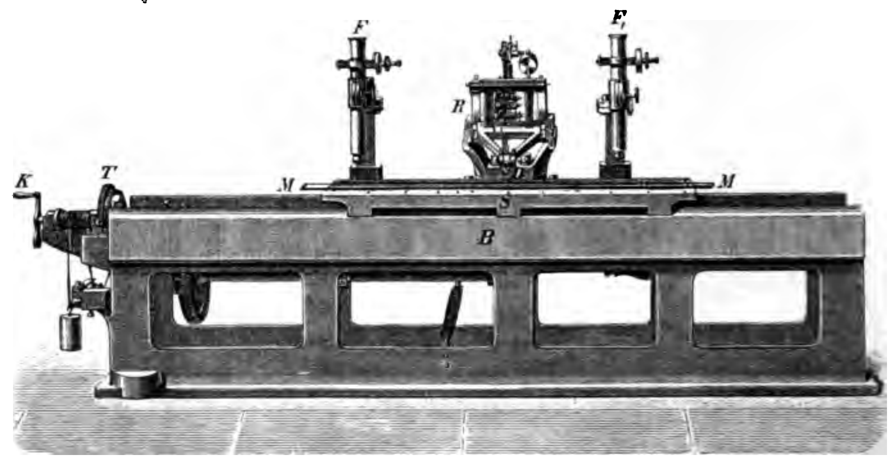


282. Libellensphärometer. 283. Kontaktmikrometer nach Abbé.

Drucke auf der Grundplatte resp. auf dem Meßobjekt aufliegt. Die Grundplatte ist eine sorgfältig plan geschliffene, in eine Vertiefung der Bodenplatte eingepaßte, auf drei Metallknöpfen ruhende Glasplatte. Die Ablesung an dem in 0,2 mm geteilten Maßstabe erfolgt mittels des horizontalen Ablesemikroskops O; die Bruchteile werden mittels eines Okularmikrometers abgelesen, das derart angeordnet ist, daß einem Intervall des Maßstabes von 0,2 mm zwei Umdrehungen der Mikrometerschraube entsprechen, und ein Trommelteil der hundertteiligen Trommel = 1 Mikron (μ) ist.

Zur Herstellung von Längenteilungen und auch zur Vergleichung von Maßstäben dient die **Längenteilmaschine**, deren einfachste Einrichtung die ist, daß vor einem Reißerwerke ein zur Aufnahme der zu teilenden resp. zu vergleichenden Maßstäbe dienender Schlitten mittels einer Mikrometerschraube fortbewegt, und die Größe der Bewegung an der geteilten Trommel der Schraube und mit Hilfe von Mikroskopen

abgelesen werden kann. In der Abb. 234 ist eine von der „Société Genevoise“ (Genf) konstruierte Teilmaschine dargestellt. Sie besteht aus einer soliden gußeisernen Bank B, welche am Anfang und am Ende Lager für eine mit geteilter Trommel T versehene Mikrometerschraube trägt. Mittels derselben kann auf der Bank ein auf Rollen laufender Schlitten S vor zwei feststehenden Mikroskopen F und F_1 verschoben werden, der mit zwei Backen eines Muttergewindes die Mikrometerschraube umfaßt. Die Feinverschiebung des Schlittens erfolgt durch Drehung der Kurbel K der Mikrometerschraube, eine gröbere Verschiebung kann nach Lösen der Backen mit der Hand erfolgen. Zur Herstellung der Teilung auf dem Maßstabe M M dient das Reißerwerk R, welches auf automatischem Wege transversal über den Maßstab geführt wird, je nachdem längere oder kürzere Striche mit dem Stahlmesser D gezogen werden sollen. Soll die Teilung auf Glas ausgeführt werden, so wird das Stahlmesser durch einen Diamant ersetzt. Neben dem zu teilenden Maßstab befindet sich ein Normalmaßstab, dessen Teilstriche nach einander mit dem Fadenkreuz der Beobachtungsmikroskope zur Koincidenz gebracht werden, worauf der Reißer über den zu teilenden Maßstab geführt wird. In Ermangelung eines Normalmaßes kann die Mikrometerschraube allein, vorausgesetzt daß sie genau bestimmt ist, zur Abmessung der Intervalle benutzt werden.

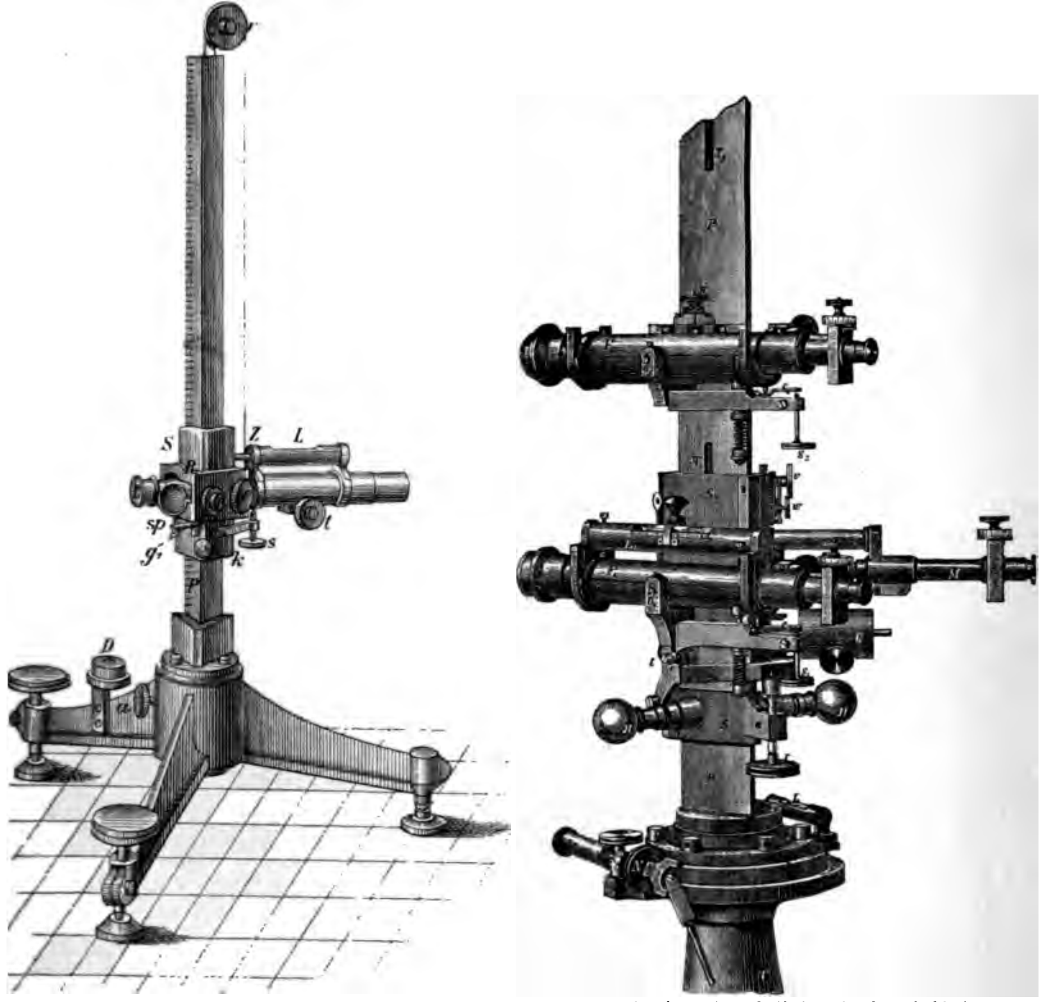


234. Längenteilmaschine.

Das Kathetometer ist ein Vertikalkomparator, der dazu dient, den Niveauunterschied zweier Punkte, welche nicht in einer und derselben Vertikalen zu liegen brauchen, zu messen. Es ist im wesentlichen folgendermaßen eingerichtet: Ein durch drei Stellschrauben und eine Libelle zu horizontierender Dreifuß trägt eine vertikale Säule, um deren Zentralachse eine mit einem feinen Längenmaßstab versehene Hülse drehbar angeordnet ist. Längs der Hülse läßt sich ein Schlittenapparat mikrometrisch verschieben, der einerseits einen Nonius zur Ablesung der Schlittenstellung am Maßstabe, andererseits ein nivellierbares, mit Fadenkreuz versehenes Fernrohr besitzt, welches auf die Punkte, deren Niveauunterschied zu messen ist, eingestellt wird.

In Abb. 235 ist ein zwar einfaches, aber zweckmäßig konstruiertes Fueßsches Kathetometer dargestellt. In das Kernstück des mit Stellschrauben und Dosenlibelle D versehenen Dreifußes paßt drehbar die konische Achse der dreiseitigen prismatischen Säule P; die Drehbewegungen derselben können durch die Schraube a, welche unter Vermittelung eines Druckstückes gegen die Achse wirkt, fixiert werden. Auf der prismatischen Säule P gleitet mit sanfter Reibung der Schlitten S, welcher mit Hilfe der Schraube f festgeklemmt werden kann. Über die am oberen Ende von P angebrachte Rolle r läuft eine Schnur, welche einerseits senkrecht über dem Schwerpunkt des aus Fernrohr, Schlitten u. s. w. gebildeten Teiles angreift, andererseits ein im Hohlraum der Säule P bewegliches Gewicht trägt, welches die Last des Fernrohrschlittens genau ausbalanciert, so daß eine besondere

Feinstelleinrichtung entbehrlich wird. Längs einer Kante der prismatischen Säule, welche bis zur Achse des Fernrohres in das Gesichtsfeld hineintritt, ist eine 1 m lange Millimeterteilung aufgetragen. Zur Beleuchtung des Maßstabes dient der kleine, drehbare Hohlspiegel sp, dessen Trägerarm am Schlitten befestigt ist. Ein Durchbruch in der Okularhülse gestattet dem vom Spiegel reflektierten Licht den Zutritt zur Teilung. Die Horizontierung des Fernrohres erfolgt mit der Libelle L und der Feinstellschraube s, auf welcher das um die Spitzenschrauben g und g_1 bewegliche Fernrohr mit eigenem Gewicht ruht.



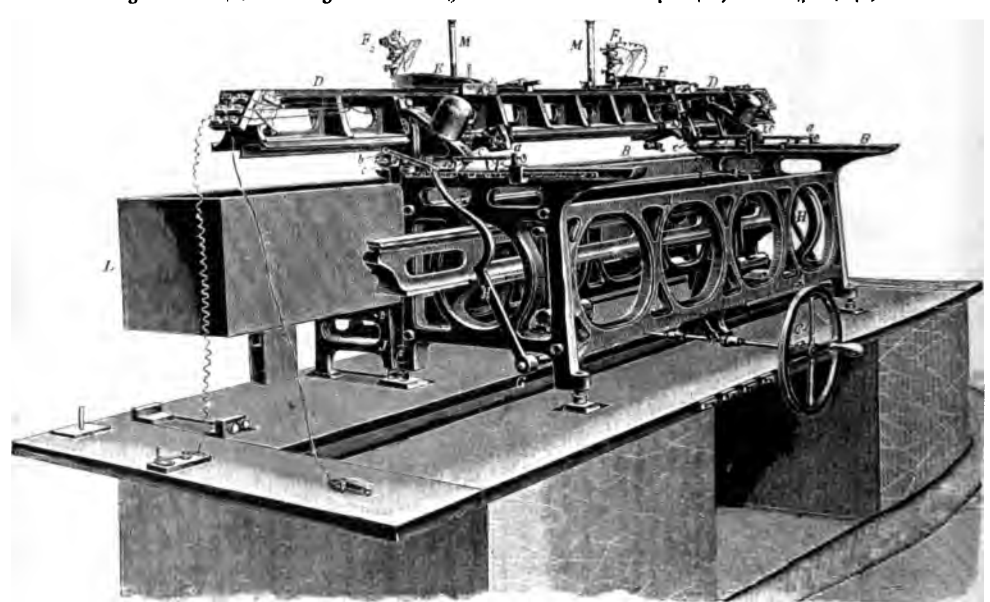
235. Fueßsches Kathetometer.

236. Bambergsches Kathetometer der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission.

Der bei einem Longitudinal-Kathetometer zu erfüllenden Bedingung, daß der Vertikalabstand der beiden durch den Ableseindex einerseits und durch die optische Achse andererseits gelegten Horizontalebenen für jede Stellung des Fernrohres eine konstante Größe sei, ist bei der gewählten Konstruktion dadurch Genüge geleistet, daß dieser Vertikalabstand = 0 gesetzt wird, oder daß der Ableseindex stets mit der optischen Achse selbst zusammenfällt. Diese Verlegung des Ableseindex in die optische Achse des Fernrohres führt die Notwendigkeit ein, den Index und also auch die Teilung, auf welcher er sich bewegt, mit der Bildebene des Objektivs zusammenfallen zu lassen, so daß die Skala die eine Hälfte des Gesichtsfeldes einnimmt und bei der Messung durch das Okular gleichzeitig dicht neben

dem zu messenden Gegenstand vergrößert erblickt wird. Der in den freien Teil des Gesichtsfeldes hinein verlängerte Inderstrich dient gleichzeitig als Einstellungsmarke. Der Ableseindex ist auf ein kreisrundes Plättchen aufgezogen. Um die Lage des Inderstriches durch die Teilstriche des Maßstabes schätzen zu können, schließt sich an ersteren noch eine nach 0,1 mm fortschreitende Hilfsteilung an, so daß man bei der starken Vergrößerung des Okulars 0,05 mm mit Leichtigkeit schätzen kann. Da die Bildebene des Objektivs unveränderlich mit der Vorderfläche des Maßstabes zusammenfällt, so ist das Objektiv gegen den Fernrohrtubus mittels Trieb- und Zahnstange verschiebbar angeordnet, um dasselbe für verschiedene Entfernungen einstellen zu können.

Die Abb. 236 stellt ein Kathetometer ersten Ranges dar, welches von dem Mechaniker Bamberg für die Kaiserliche Normal Aichungs-Kommission zu Berlin hergestellt ist. Eine wesentliche Neuerung in der Konstruktion dieses Kathetometers liegt in der Anordnung der Skala. Das Prisma enthält nämlich nur eine auf eingelassene Silberstifte aufgetragene Zentimeterteilung. Dagegen trägt der Führungsschlitten des Hauptfernrohres auf einer neben der Hauptteilung gleitenden Skala eine Teilung von zehn einzelnen Millimetern, deren Lage an der Hauptskala bis auf Tausendstel des Millimeter genau mit Hilfe eines besonderen Mikrometermikroskopes M ermittelt wird. Das um seine Achse drehbare Prisma P von dreieckigem Querschnitt trägt den aus zwei Teilen S und S_1 bestehenden Hauptschlitten und

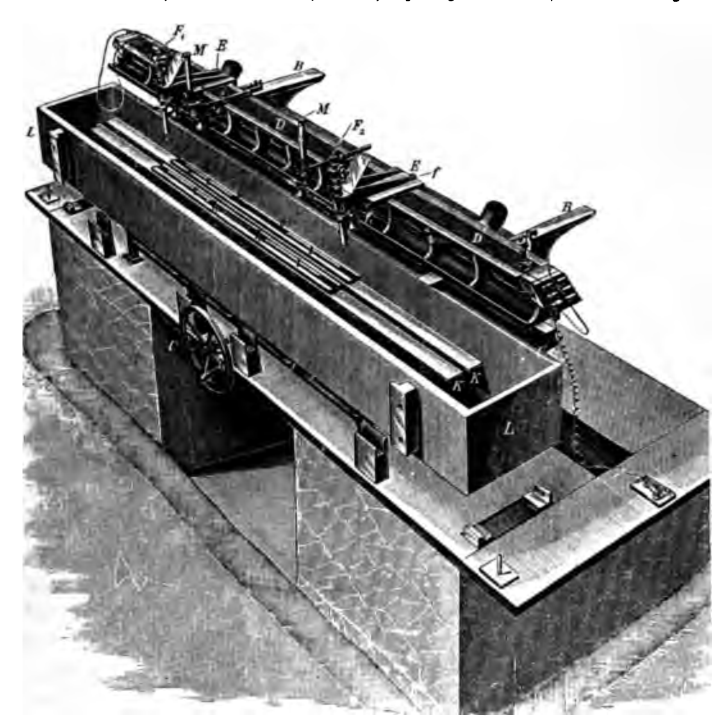


237. Repsoldscher Komparator der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission.

den zur Führung des zweiten Fernrohres bestimmten Nebenschlitten S_2. Die Temperatur von P kann durch zwei oben und unten eingelassene Thermometer T_1 und T_2 ermittelt werden. P trägt unten einen zu einer ringförmigen Platte sich erweiternden Ansatz, der mit einem konischen Zapfen verbunden ist und mit diesem in einer Buchse T sich drehen läßt. Die Platte des Zapfens trägt auf der einen Seite eine die Vertikalstellung der Drehachse kontrollierende Libelle L, auf der anderen eine Mikrometerklemme N, welche mit Hilfe eines Hookeschen Gelenkes bewegt werden kann und zur Feinstellung des Prismas bei seiner Drehung dient. Der obere Teil S_1 des Hauptschlittens trägt auf der Frontseite das Lager für das Fernrohr F_1 und die Libelle L_1, auf den beiden Rückseiten rechts das Ablesemikroskop M, links zwei (in der Figur nicht sichtbare) Rollen, welche durch Ausschnitte in S_1 hindurch mittels Federn gegen das Prisma gedrückt werden zur Vermittelung einer sanften Führung der Schlitten. Auf dem anderen Teil S sind zwei Holzgriffe H aufgesteckt für die Grobeinstellung des Schlittens; zur Feinstellung desselben wird S festgeklemmt und hierauf der obere Schlittenteil S_1 mittels der Schraube r und des Hebels h mikrometrisch verschoben. Das Lager des Fernrohres F_1 ist für sich verstellbar, indem es um eine bei O_1 die optische Achse schneidende Horizontale mittels der Schraube s_1 und des Hebels c_1 gedreht werden kann. Auch das Ablesemikroskop M ist innerhalb des Schlittens S_1 in vertikaler Richtung verschiebbar. Das

zweite Fernrohr F_2 ist ebenso gelagert wie F_1 und wird mit der abnehmbaren Libelle L_1 gleichfalls nivelliert. Das Gewicht sämtlicher Schlitten ist durch Gegengewichte abgeglichen, welche mit Schnüren an Rollen wirken, die vom Kathetometer unabhängig befestigt sind.

Zum Messen und zur Vergleichung von Längen dienen ferner die Komparatoren, von denen wir unterscheiden können: Komparatoren mit Fühlhebeln, bei welchen der zu bestimmende Maßstab einerseits gegen ein unverrückbares Ansatzstück gestemmt wird, während das andere Ende gegen einen Fühlhebel drückt, dessen Bewegung durch geeignete Übertragung auf einen über einer Teilung einspielenden Zeiger in vergrößertem Maße markiert wird und Komparatoren mit Mikroskopen, die im wesentlichen aus einem zur Aufnahme der Maßstäbe dienenden Lineal bestehen, über welchem zwei mit Mikroskopen versehene Schlittenapparate mikrometrisch verschoben werden können. Man nennt die zum Messen horizontaler Längen dienenden Komparatoren wohl auch Horizontalkomparatoren, zum Unterschied von den zur Messung vertikaler Längen dienenden Vertikalkomparatoren oder Kathetometern.



238. Repsoldscher Komparator der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission.

Es möge von dieser Gattung von Meßapparaten einer der vorzüglichsten beschrieben werden, nämlich der Repsoldsche Universalkomparator der Kaiserlichen Normal-Aichungs-Kommission zu Berlin, der zur Vergleichung von Endmaßen und Strichmaßen bis 2 m Länge eingerichtet ist.

Ein festes, auf dem isolierten Pfeiler des Komparatorsaales ruhendes gußeisernes Rahmengestell A (Abb. 237) ist mit zwei horizontalen Gleitbahnen B von 1,45 m Länge für einen auf Rollen c laufenden Wagen D von ungefähr 2 m Länge versehen. Dieser Wagen, der vermittelst der Handräder C und des um die Achse G drehbaren Hebelsystems b H verschoben werden kann, trägt die beiden Schlitten E E, die durch Schrauben f (Abb. 238) auf dem Wagen in jeder beliebigen Stellung festzuklemmen sind, mit den Mikrometermikroskopen F_1 und F_2. Die Mikroskope sind mit einer Einrichtung versehen, welche eine bis auf 0,5 Mikron genaue Fokaleinstellung ermöglichen. Die Mikroskophalter sind mit auf den Schlitten befestigten Kollimatoren (Visieren) W (Abb. 240) und Libellen versehen zur Horizontalstellung der Drehachsen der Mikroskophalter. Der eigentliche Mikroskophalter V, in dem das Mikroskoprohr durch die Brückenschrauben k gehalten wird, ist durch die Schrauben v verstellbar verbunden mit U; dieser Teil wieder dreht sich um die Kollimatorachse und kann durch die Stellschraube w nach seiner Vertikaljustierung in eine für bequeme Beleuchtung der Objekte günstige Lage geneigt und dann durch die Muttern w_1 festgestellt werden.

Die Beleuchtung der einzelnen Teile erfolgt mittels kleiner, durch Akkumulatoren erregter 4-Volt-Lampen mit mattem Glase, welche, um eine bedeutendere Erwärmung zu

vermeiden, lediglich während der kurzen Dauer der Ablesungen eingeschaltet werden. Auf demselben Pfeiler ruht neben dem Hauptapparat ein eichener Kasten N (Abb. 239), der in sich einen doppelwandigen Trog O aus 3 mm starkem Messingblech aufnimmt. Der Hohlraum zwischen den Doppelwänden kann mit einer Flüssigkeit ausgefüllt werden, welche behufs Herstellung gleichmäßiger Temperaturen kurz vor der Beobachtung in strömende Bewegung versetzt wird durch die Schöpfbrunnenvorrichtung PP mit Motorantrieb an dem einen Ende des Troges. Innerhalb des letzteren steht erst ein aus 9 mm starkem Messing hergestellter Kasten Y zur Aufnahme der Objekte. Die zu vergleichenden Maßstäbe ruhen auf Rollen, die vermittelst kleiner Schlitten d auf Schienen R an einem gußeisernen Gestell verschoben werden können. Zur Feststellung resp. Beseitigung des schädlichen Einflusses der Durchbiegung der Maßstäbe wird die Entfernung der Achsen dieser Rollen von einander dadurch bestimmt, daß man auf die Rollen kleine Reiter mit Libellen aufsetzt und nach ihrer Justierung an einem auf die Indices an den Reitern gelegten geteilten Maßstabe die Entfernung abliest. Die Auf- und Abbewegung der Schienen R wird durch Gliederketten von den Handgriffen f und g aus bewirkt. Ebenso erfolgen geringe seitliche Verschiebungen der Maßstäbe durch Verschiebung der Schienen R mittels des Handgriffes h und kleine Längsbewegungen durch mikrometrische Achsendrehung der Rollen durch die Handgriffe i. Alle diese Griffe zur Herbeiführung einer Bewegung innerhalb des Kastens Y befinden sich außerhalb desselben, um Eingriffe in den Trog zu vermeiden, welcher zum Schutz gegen Wärmestrahlung von den Lampen aus mit Metallplatten bedeckt wird, die nur Ausschnitte zur Ablesung der Strichmarken auf den Maßstäben und der zur Bestimmung der Temperatur der Maßstäbe dienenden Thermometer haben. Diese Thermometer liegen auf den Schienen R in Lagern l möglichst nahe bei den Maßstäben, und zwar gehören je zwei zu einem Maßstab. Der äußere Trog wird mit einer Glastafel überdeckt, deren Öffnungen mit denen der vorhin erwähnten Metallplatte korrespondieren. Die Mikrometerschrauben der Mikroskope haben eine Ganghöhe von 0,2 mm, und ihre Trommeln sind in 100 Teile eingeteilt. Da die Objektivvergrößerung eine zweifache ist, so bewirkt die Drehung der Schraubentrommel um ein Teilungsintervall eine Verschiebung der Fäden um diejenige Größe, in der sich eine Strecke auf dem Maßstabe von 1 μ in der Fadenebene des Mikroskopes abbildet. Die Einstellung der Trommel kann auf Zehntelintervalle abgelesen werden. Bezeichnet man ein Zehntelintervall der Trommelteilung als 1 pars derselben, so entspricht also einer Verschiebung um 1 pars der Trommel ein Unterschied der Strichlage von 0,1 μ.

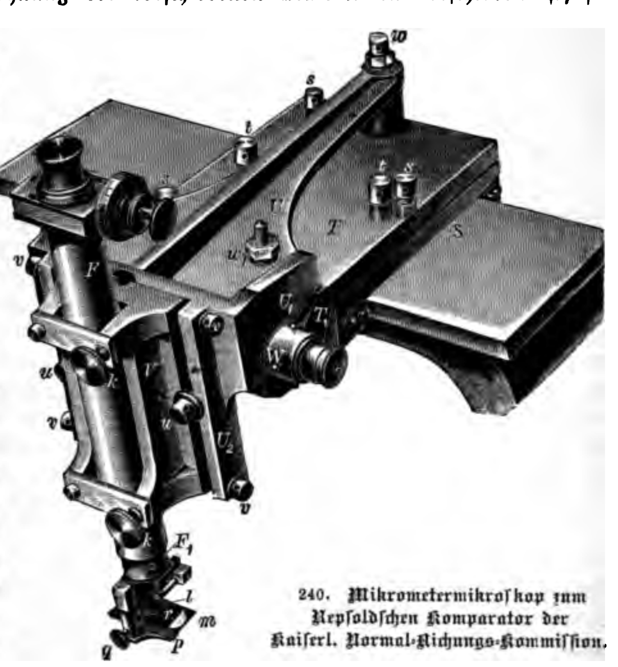


239. Trog für Ausdehnungsbestimmungen zum Repsoldschen Komparator der Kaiserl. Normal-Eichungs-Kommission.

Berühmte Werkstätten für die Anfertigung von Komparatoren, Kathetometern, Teilmaschinen sind die von Repsold in Hamburg, von Breithaupt in Kassel, von Reichel in Berlin, von Bamberg in Friedenau bei Berlin, von Fueß in Steglitz bei Berlin, von Brunner in Paris, von der Société Genevoise pour la construction d'instruments de physique in Genf u. s. w.

Mit Hilfe der genannten Meßapparate werden nun Längen gemessen und auch die Fehler von Maßstäben bestimmt. Bei einem geteilten Maßstabe hat man zu unterscheiden den Fehler der Gesamtlänge bei der Normaltemperatur, welcher sich proportional auf die ganze Länge verteilt, und die internen oder Teilungsfehler, welche im allgemeinen nicht gesetzmäßig verlaufen, sondern von Zufälligkeiten abhängen und deshalb von Intervall zu Intervall bestimmt werden müssen, entweder durch Anwendung des Besselschen Verfahrens, bei welchem zunächst die Fehler der Hauptstriche bestimmt und an deren Bestimmung die der anderen angereiht werden, oder des umständlicheren Hansenschen Verfahrens, bei welchem jedes Intervall des zu prüfenden Maßstabes mit jedem Intervall des Normalmaßstabes verglichen, also alle möglichen Kombinationen der Vergleichungen der Intervalle beider Stäbe in systematischer Reihenfolge ausgeführt werden.

Da die Länge eines Maßstabes, wie bereits bemerkt, wesentlich von der Temperatur abhängig und die Wärmeausdehnung der verschiedenen Materialien verschieden ist, so muß der Wärmeausdehnungskoeffizient eines Maßstabes dadurch bestimmt werden, daß er mit einem Normalmaßstab von bekannter Ausdehnung bei möglichst verschiedenen Temperaturen verglichen wird. Die Hauptschwierigkeit für diese wie für alle Präzisionsmessungen bildet die Herstellung konstanter Temperaturen. Die Beobachtungssäle des im vorigen Kapitel erwähnten bureau international in Paris sind für diesen Zweck mit Präzisionstemperierung versehen. Erwärmte und abgekühlte Luft wird von Ventilatoren durch ein geeignetes Röhrensystem aus dem Maschinenhause in diese Säle getrieben. Sie sind mit doppelten, einen Zwischenraum von etwa 2 Dezimeter bildenden, kannelierten Zinkwänden ausgekleidet, an deren äußeren Rückseiten von allen Seiten her Salzwasser herabrieselt, welches durch Pumpen aus dem Maschinenhaus nach dem Observatorium befördert wird. Diese von Raoul Pictet & Co. angelegte Präzisionstemperierung soll es nach dem Procès verbaux des séances du bureau international des poids et mésures ermöglichen, jeden Saal innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit auf eine beliebige, zwischen — 1° und + 30° C. gelegene Temperatur abzukühlen oder zu erwärmen und auf der gewählten Temperatur mit Schwankungen von nur 0,1 ° C. zu erhalten. Eine ähnliche Präzisionstemperierung, aber ohne das Berieselungssystem, das sich nicht bewährt hat, da durch das Salzwasser die Wände angegriffen werden, besitzen die Komparatorsäle der Kaiserlichen Normal-Aichungs-Kommission zu Berlin.



240. Mikrometermikroskop zum Repsoldschen Komparator der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission.

Daß bei feineren Messungen alle Vorsichtsmaßregeln getroffen werden müssen, um den schädlichen Einfluß der Körperwärme des Beobachters möglichst auszuschließen, braucht wohl kaum besonders hervorgehoben zu werden. Die Genauigkeitsgrenze, bis zu welcher wir heutzutage mit den uns zu Gebote stehenden Präzisions-Meßinstrumenten Längen sicher bestimmen können, beträgt 0,1 Mikron (μ), das ist ein Zehntausendstel eines Millimeter.

Man begegnet noch heute vielfach der Ansicht, daß eine Längenmaßbestimmung, bei welcher eine Genauigkeit von etwa 0,001 mm erstrebt wird, wohl nur einer Art wissen-

schaftlicher Liebhaberei, nicht aber einem wirklich praktischen Bedürfnisse entspreche. Dieser Ansicht muß entschieden widersprochen werden. Denn nicht nur von Gelehrten oder rein wissenschaftlichen Instituten, sondern mitten aus der Praxis, aus mechanischen Werkstätten, industriellen Etablissements, Feuerwerkslaboratorien u. s. w. wird jährlich eine große Anzahl von Maßstäben mit dem Ersuchen, dieselben bis auf einige Tausendstel, ja bis auf ein Tausendstel des Millimeter genau zu bestimmen, an die zuständige Behörde eingesandt. Um nur ein Beispiel aus der Praxis zu erwähnen, bei welchem die angegebene Genauigkeitsgrenze innegehalten werden mußte, so stellte sich bald nach der Einführung der neuen deutschen Goldmünzen heraus, daß die in den verschiedenen Münzen Deutschlands geprägten 10- und 20-Markstücke Differenzen in Bezug auf Höhe und Tiefe ihrer Reliefs zeigten, was bei der üblichen Schichtenabzählung zu Unsicherheiten und Irrtümern Veranlassung bot; es ist ersichtlich, daß zum sicheren Nachweis der Existenz der Differenzen und der Bestimmung ihrer Größe an korrespondierenden Punkten der Reliefs der einzelnen Goldstücke bei der Messung eine Genauigkeit von 0,001 mm erstrebt werden mußte.

Apparate zur Bestimmung der Masse.

Einfache chemische Wage. Wägungsmethoden. Stückrathsche Vakuumwage. Jollys Versuch zur Bestimmung der Gravitationskonstante und der Dichtigkeit der Erde. Versuche von A. König und F. Richarz.

Die Naturwissenschaften, die förderndsten Mächte für die Entwickelung der Menschheit im letzten Jahrhundert, haben ihre großartigen Erfolge fast lediglich der Verfeinerung der Meßapparate und der Vervollkommnung der Meßmethoden zu verdanken. So nüchtern es auch klingen mag, der Triumph der Forschung beruht vorwiegend auf verständigem Gebrauch von Maßstab, Teilkreis, Schraube, Hebel, Pendel und Gewicht. Genaue Winkelmessungen erst geben dem Astronomen das Fundament für seine wunderbaren Berechnungen; der Physiker mißt Wellenlängen des Lichts, die Milliontel des Millimeter betragen. Die Luft, die wir atmen, wägt der Chemiker wie der Physiologe; er wägt sie wieder, wenn wir sie ausatmen, und sagt dann, wieviel wir während dieser Zeit zum Leben gebraucht haben. Wieviel Sauerstoff im Rosthauch des Stahles enthalten ist, zeigt die Wage. Sie ist das Instrument, dessen Ausbildung und zweckmäßige Anwendung den alten verkehrten Theorieen eines Wärmestoffes oder Phlogiston den Todesstoß versetzt hat.

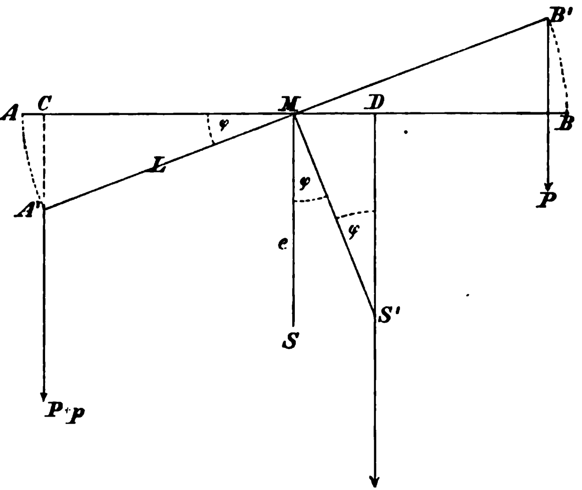
Wenn die Schwerkraft freibewegliche Körper nach dem Mittelpunkt der Erde zu bewegt, dieselben zum Fallen bringt, so wirkt sie nicht minder auch auf alle anderen, welche diesem Zuge nicht Folge leisten können. Ein Stein, der vorher von einem Turme herabfiel, ist dadurch, daß er nun ruhig auf dem Boden liegt, nicht der Anziehung entrückt. Sie wirkt vielmehr noch mit genau derselben Stärke auf ihn und äußert sich als ein Druck des Steines auf die Unterlage, welche seine Weiterbewegung hindert. Wir nennen die Größe dieses Druckes des Körpers auf seine Unterlage das Gewicht des Körpers. Dasselbe ist für verschiedene Körper verschieden.

Schon in den frühsten Zeiten hat man das Gewicht der Körper als einen Maßstab zur Beurteilung der Menge ihrer Substanz angesehen und Instrumente und Methoden erfunden, um sein Gewicht bestimmen zu können. Zur Bestimmung dieses Gewichtes dienen nun die Wagen. Es wird sich sehr schwer die Frage beantworten lassen, wer ihr Erfinder gewesen. Sie bieten sich in ihrer ursprünglichen Einfachheit so ohne weiteres dem Bedürfnis dar, daß die Anwendung ihres Prinzips mehr als das Ergebnis eines allgemeinen Bildungszustandes anzusehen ist, denn als die glückliche, vorausgreifende Idee eines Einzelnen.

Da jede Art von Handel notwendigerweise Messen und Wägen voraussetzt, so hat man von manchen Seiten auch dem ältesten Handelsvolke, den Phöniziern, die Erfindung der Wage und der Gewichte vindizieren wollen, indessen ohne alle anderen als jene äußerlichen Gründe, welche in dem ausgebreiteten Verkehre der ersten Kauffahrer liegen. Aus der Bibel ist bekannt, daß Abraham (1. Mos. 23, 16) bereits das Silber abwog und Moses mehrerer Arten der Maße und Gewichte gedenkt. Im Buche Hiob ist von Wagschalen die Rede, und in der Iliade finden sich mehrere Stellen, welche beweisen, daß schon zu Zeiten Homers die Wage ein allbekanntes Instrument war.

Die Wagen wurden von Anfang an nach denselben Grundprinzipien ausgeführt, die auch heute noch maßgebend sind. Wir können, wenn wir von den vorzugsweise zur Bestimmung spezifischer Gewichte dienenden, auf den Gesetzen der Hydrostatik beruhenden Senkwagen absehen, zwei Hauptarten von Wagen unterscheiden, je nachdem sie sich auf die Gesetze der Elastizität oder auf die Hebelgesetze gründen. Bei den auf den Gesetzen der Elastizität beruhenden Federwagen wird das Gewicht durch die Größe der durch dasselbe bewirkten Zusammendrückung oder Ausdehnung einer Spiralfeder oder der Biegung eines elastischen Stabes bestimmt. Eine größere Genauigkeit läßt sich aber mit Hilfe der Federwage nicht erzielen, da die elastische Kraft der Metallfeder sehr stark durch atmosphärische Einflüsse und in noch höherem Maße durch die Temperatur verändert wird. Bei den auf den Gesetzen des Hebels beruhenden Wagen unterscheidet man gleicharmige und ungleicharmige. An anderer Stelle sind bereits die verschiedenen Gattungen der Federwagen, sowie der auf den Hebelgesetzen beruhenden Wagen, soweit sie in der Technik Verwendung finden und im Handel und Verkehr geringeren Anforderungen an Präzision entsprechen, behandelt worden. An dieser Stelle soll nur die für feinere Wägungen dienende, auf die Hebelgesetze gegründete zweiarmige, gleicharmige Wage oder, wie sie kurz genannt wird, die „chemische Wage“ ihre Besprechung finden.

Eine gute chemische Wage besteht im wesentlichen aus drei Teilen, aus einer festen ebenen Unterlage für die Drehachse des Wagebalkens, aus diesem selbst und aus den Wageschalen. Der hauptsächlichste dieser Bestandteile ist der Wagebalken, auf dessen Herstellung die größte Sorgfalt zu verwenden ist. Dieser ist ein gleicharmiger Hebel, der mit einer in seiner Mitte angebrachten prismatischen Schneide auf einer ebenen Unterlage aufliegt und an seinen beiden Enden gleichfalls mit Schneiden versehen ist, die zur Aufnahme der Gehänge der Wageschalen resp. der Gewichte dienen. Die Theorie der Wage verlangt, daß die beiden Endschneiden mit der Hauptschneide in einer und derselben Horizontalebene liegen und ihr parallel sind. Es muß daher der Wagebalken einer Präzisionswage mit Justierungsvorrichtungen versehen sein, welche es ermöglichen, die Endschneiden parallel der Hauptschneide und in dieselbe Horizontale mit ihr zu bringen. Nimmt man an, daß die beiden Arme des Wagebalkens symmetrisch, genau gleich lang und gleich schwer sind — eine Annahme, die niemals streng erfüllt ist, und welche daher die Anwendung bestimmter Wägungsmethoden (vgl. S. 223) erheischt, um den aus der Verschiedenheit der Länge resultierenden Fehler zu beseitigen — liegen also die beiden Endschneiden gleichweit von der Hauptschneide entfernt und ihr parallel in einer und derselben Ebene, sind ferner die Gehänge und die Schalen gleich schwer, und befinden sich in ihnen absolut gleiche Gewichte P, so wird der Wagebalken in horizontaler Lage sich im Gleichgewicht befinden, und dies Gleichgewicht wird offenbar ein stabiles sein, wenn sich der Schwerpunkt des Wagebalkens vertikal unterhalb der Auflagelinie der Schneide befindet.

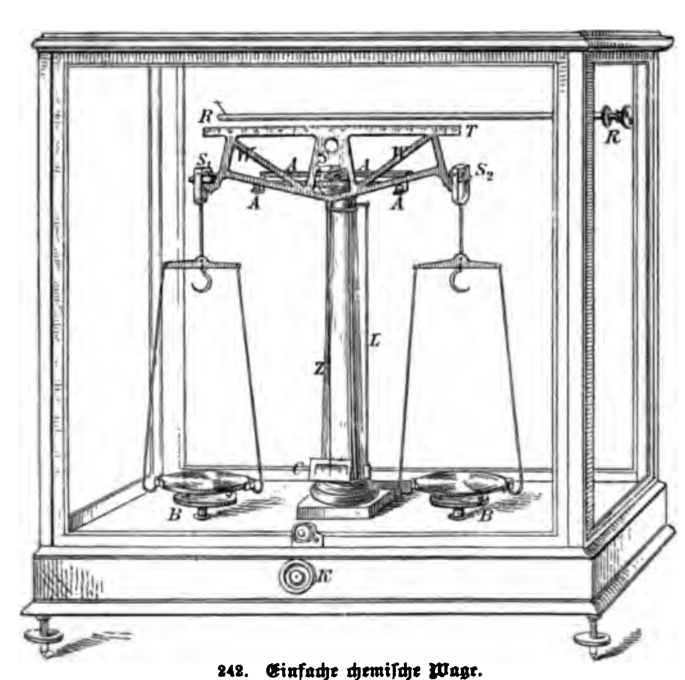


241. Prinzip der Wage.

Ein geringes Übergewicht p auf die eine Seite gebracht, wird eine Neigung des Wagebalkens um den Winkel φ zur Folge haben (Abb. 241). Diese Neigung, die gewöhnlich durch eine in der Mitte des Balkens angebrachte, über eine Skala einspielende Zunge markiert wird, bietet nicht nur ein Maß für die Größe des Übergewichts p, sondern auch für die Empfindlichkeit der Wage. Man versteht in der praktischen Physik unter

Empfindlichkeit der Wage den Ausschlag, welchen die Wage bei einer bestimmten (beiderseitigen) Belastung pro 1 mg Übergewicht anzeigt. Die Empfindlichkeit ist, wie eine hier nicht näher auszuführende Betrachtung ergibt, direkt proportional der Länge des Wagebalkens und umgekehrt proportional dem Produkt aus seinem Gewicht und dem Abstand seines Schwerpunktes von der Mittelschneide.

Da die Empfindlichkeit einer Wage mit der Länge des Wagebalkens zunimmt, so pflegte man früher denselben möglichst lang zu konstruieren; da aber andererseits die Empfindlichkeit mit dem zunehmenden Eigengewichte des Wagebalkens abnimmt, so wendet man in neuerer Zeit, nach dem Vorgange von Bunge in Hamburg, kürzere Wagebalken und zwar die wie ein Hängewerk wirkende Dreiecksform des Wagebalkens an, welche infolge der Anwendung der zähen Aluminiumbronze der theoretisch vorteilhaftesten Form (geringstes Eigengewicht bei größter Steifigkeit) möglichst nahe kommt, wodurch selbst bei großer Belastung eine sehr geringe Durchbiegung und verhältnismäßig bedeutende Empfindlichkeit erzielt wird.



242. Einfache chemische Wage.

An einer gegebenen Wage kann, da Länge und Gewicht des Wagebalkens sich nicht verändern lassen, die Empfindlichkeit gesteigert werden durch Veränderung der Entfernung seines Schwerpunkts von der Hauptschneide, was in der Regel vermittelst eines auf der Zunge befindlichen Laufgewichtes geschieht. Für die Vorzüglichkeit einer Wage bietet ihre große Empfindlichkeit keinen Maßstab, wie man noch häufig anzunehmen pflegt, sondern die Güte einer Wage hängt vielmehr ab von der Übereinstimmung der durch mehrfache unabhängige Beobachtungen mittels derselben erhaltenen Wägungsresultate.

In Abb. 242 ist eine einfache chemische Wage mit Gehäuse dargestellt. Dieselbe ist zunächst mittels der 3 Stellschrauben und des Lotes L zu horizontieren. Der Wagebalken W ruht mit seiner Hauptschneide S aus Stahl auf einer ebenen Achatplatte, während auf seinen Endschneiden S_1 und S_2 die Achatpfannen der Gehänge aufliegen. Der Wagebalken ist mit einem geteilten Lineal T versehen, auf welches kleine Reitergewichte mittels der durch den Wagekasten hindurchgehenden Reiterverschiebungsvorrichtung R behufs Ausgleichung oder zur Bestimmung der Empfindlichkeit aufgesetzt werden können. Manipulationen dürfen an der Wage nur vorgenommen werden, wenn der Wagebalken arretiert ist. Während einer Wägung ist der Wagekasten geschlossen zu halten, um den schädlichen Einfluß von Luftströmungen und Temperaturschwankungen zu vermeiden. Ferner muß das Arretieren und Loslassen des Wagebalkens mit großer Sorgfalt ausgeführt werden, um die Hauptschneide vor Erschütterungen und mechanischen Einwirkungen zu schützen. In der Zeichnung ist der Wagebalken durch den Arretierungsbalken AA arretiert, d. h. er ist mit seiner Hauptschneide von dem Achatlager abgehoben. Ebenso sind die Wageschalen durch die Schalenarretierungen B arretiert. Um die Wage in Thätigkeit zu setzen, wird der Arretierungsbalken mit den Schalenarretierungen gesenkt, was durch Linksdrehung des Knopfes K geschieht. Der Wagebalken ruht alsdann mit seiner Schneide auf seinem Achat-

lager auf und führt eine Reihe pendelartiger Schwingungen aus, welche mittels der Zunge Z an der Skala C abgelesen werden. Man berechnet die Gleichgewichtslage aus 3 unmittelbar auf einander folgenden Ausschlägen der Zunge, indem man 2 Ausschläge nach der einen Seite zum arithmetischen Mittel vereinigt und dieses Mittel mit dem Ausschlage nach der entgegengesetzten Seite zu einem Mittelwerte kombiniert.

Wägungsmethoden. Um die aus der Ungleichheit der Hebelarme des Wagebalkens entstehende Fehlerquelle zu beseitigen, pflegt man zwei Methoden der Wägung anzuwenden: die Tariermethode und die Methode der Vertauschung der Gewichte.

Das Prinzip einer Wägung nach der Tariermethode besteht darin, daß man das zu bestimmende Gewicht P zunächst mittels beliebiger Taragewichte abtariert und hierauf bei unveränderter Tara P durch Normalgewichte N ersetzt. Dadurch werden die beiden Größen P und N mit einer und derselben dritten Größe, der Tara, und infolgedessen unter einander verglichen. Ergibt nämlich die erste Wägung Tara $= P + \alpha$, und die zweite Tara $= N + \beta$, wo α und β die an der Skala beobachteten Gleichgewichtslagen sind, welche durch die Empfindlichkeitsbestimmung in Milligrammen ausgedrückt werden können, so folgt durch Kombination beider Gleichungen $P = N + \beta - \alpha$.

Die Methode der Vertauschung der Gewichte oder der doppelten Wägung (Gaußsche Wägung) besteht darin, daß das zu bestimmende Gewicht P auf die eine und Normalgewichte auf die andere Wagschale gelegt werden, bis nahezu Gleichgewicht eingetreten ist, und daß dann die Gewichte P und N mit einander vertauscht werden. Ergeben die beiden Wägungen die beiden Gleichungen $P = N + \alpha$ und $P = N + \beta$, so erhält man durch Kombination beider Gleichungen $P = N + \frac{\alpha + \beta}{2}$.

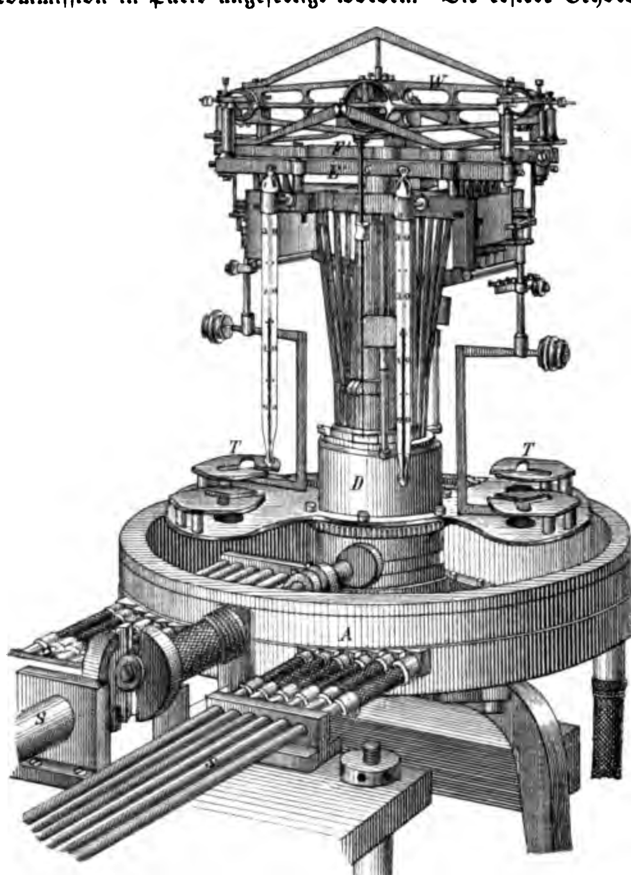
Es ist bereits erwähnt worden, daß die Körperwärme des Beobachters eine nicht unbeträchtliche Fehlerquelle bei Präzisionsmessungen bildet, und daß man sie daher möglichst unschädlich zu machen suchen muß. Es sind deshalb in neuerer Zeit Wagen konstruiert worden und vielfach in Gebrauch, bei welchen, zur Beseitigung der beim Öffnen des Wagekastens im inneren Wägungsraume durch die Körperwärme des Beobachters hervorgerufenen Temperatur- und Luftströmungen, alle beim Wägen vorkommenden Operationen von beliebig großer Entfernung aus ausgeführt werden können, ohne daß man nötig hat, den Wagekasten zu öffnen, wobei man dann die Schwingungen der Wage mittels Fernrohr und Skala beobachtet.

Der wichtigste und interessanteste Fortschritt auf dem Gebiete der Präzisionswägungen ist aber in der neuesten Zeit mit der Konstruktion der Vakuumwage gemacht worden, mit Hilfe deren eine Wägung nicht nur im luftabgeschlossenen, sondern auch im luftverdünnten, ja luftleeren Raum ausgeführt werden kann. Sollen nämlich zwei Körper von sehr verschiedenem spezifischen Gewicht, z. B. ein Kilogramm aus Platin und ein Kilogramm aus Bergkrystall mit einander verglichen werden, so wird das Bergkrystallkilogramm, weil das Archimedische Prinzip — daß ein Körper in eine Flüssigkeit getaucht, so viel an Gewicht verliert, als die von ihm verdrängte Flüssigkeitsmenge wiegt — für die tropfbaren Flüssigkeiten wie für die luftförmigen gilt, einen der Volumendifferenz beider Stücke entsprechenden größeren Auftrieb in der Luft erleiden, als das Platinkilogramm. Wären daher beide Gewichtsstücke im luftleeren Raume absolut gleich, so würde in der Luft das Bergkrystallkilogramm sich um so viel leichter erweisen, als ein der Volumendifferenz dieser beiden Gewichtsstücke gleiches Quantum Luft wiegt. Beträgt das Volumen des Kilogramm aus Platin [spez. Gewicht 21,5] 46,5 ccm und dasjenige des Kilogramm aus Bergkrystall [spez. Gewicht 2,65] 377,4 ccm, so würde das Bergkrystallkilogramm, da 1 ccm Luft bei mittleren meteorologischen Verhältnissen 1,2 mg wiegt, in der Luft um

$$(377{,}4 - 46{,}5) \,.\, 1{,}2 \text{ mg} = 397{,}08 \text{ mg}$$

leichter sein als das Platinkilogramm. Bei genauen Wägungen muß daher stets das Luftgewicht berücksichtigt werden. Daß dies nicht nur eine unabweisliche Forderung für streng wissenschaftliche Wägungen, sondern geradezu eine praktische Notwendigkeit ist, erhellt aus dem angeführten Beispiel. Denn wollte man etwa in einer Münzstätte Goldbarren mittels Normalgewichte aus Messing oder gar aus Bergkrystall abwägen, so dürfte die

Berücksichtigung des Luftgewichtes in höherem Grade aus rein praktischen, als aus wissenschaftlichen Gründen geboten erscheinen. Man versteht in der Wissenschaft unter dem Gewicht eines Körpers stets sein Gewicht bezogen auf den luftleeren Raum und nennt es dann sein absolutes Gewicht. Die Kenntnis des jeweiligen Luftgewichts ist aber wegen der Schwierigkeit der Ermittelung des Feuchtigkeitsgehaltes und der Temperatur der Luft mit einer Unsicherheit behaftet, und um von letzterer unabhängig zu werden, wendet man in neuester Zeit Vakuumwagen an. Dieselben sind zuerst von Bunge in Hamburg für die Kaiserliche Normal-Aichungs-Kommission in Berlin und die Internationale Meterkommission in Paris angefertigt worden. Die erstere Behörde befindet sich im Besitze einer zweiten, vom Mechaniker P. Stückrath in Friedenau bei Berlin konstruierten Vakuumwage, die an dieser Stelle ihre Beschreibung finden soll.

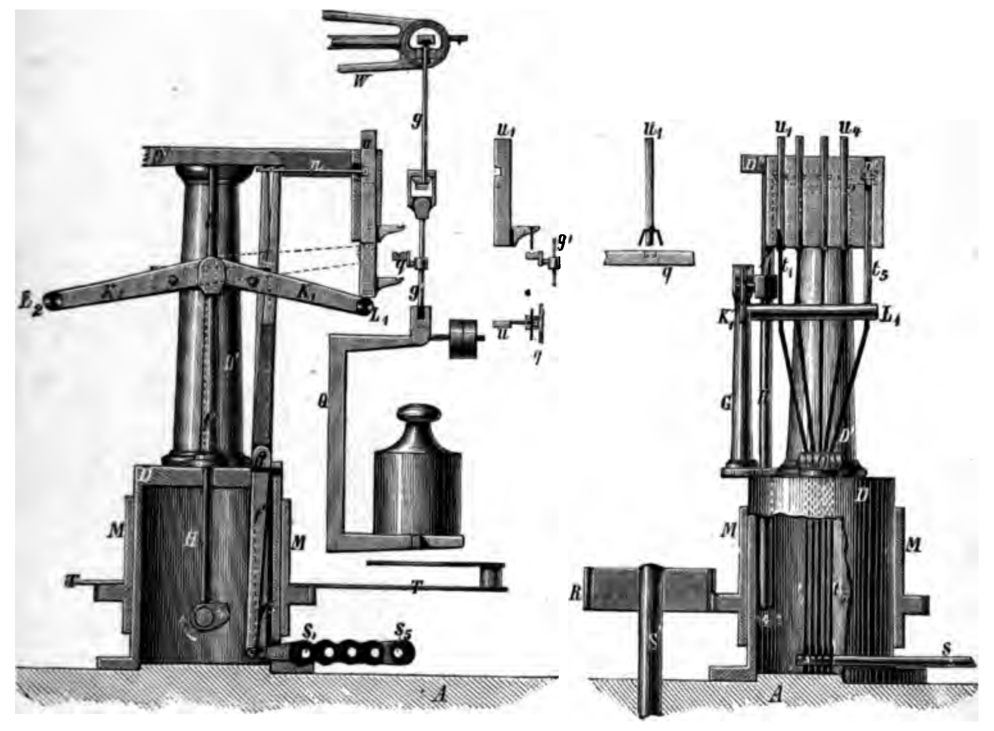


243. Neueste Vakuumwage der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission von Stückrath.

Die ganze Wage steht auf einem Messingteller A (Abb. 243) und auf diesem ein luftdicht abschließender Glascylinder mit luftdicht schließendem Messingteller B, welche in der Abbildung fortgelassen sind. Durch den Teller A hindurch geht eine Anzahl durch Stopfbuchsen abgedichteter Bewegungsstangen S und s, die von einem entfernt stehenden Beobachter in Thätigkeit gesetzt werden können. Durch diese Stangen, welche mit geeigneten Mechanismen im Innern des Glascylinders verbunden sind, können folgende Bewegungen ausgeführt werden: 1) der Wagebalken W kann arretiert werden; 2) ein Transporteur T kann gehoben oder gesenkt werden, und damit können die zu vergleichenden Gewichtsstücke auf die Schalen niedergesetzt oder die auf ihnen stehenden Stücke abgehoben werden; 3) durch eine Zahnstangenübertragung kann der Transporteur um 180° gedreht werden; 4) so viel kleinere Gewichtsstücke, als zur Ausgleichung der Belastung beider Schalen erforderlich sind, können an jeden Wagearm angehängt oder von demselben fortgenommen werden.

In Abb. 243, welche eine perspektivische Gesamtansicht der Wage darstellt (sie enthält einige Verbesserungen, z. B. je sechs Gleitstangen nebst Zubehör auf jeder Seite, einen zweiten Hilfstransporteur u. s. w., welche in den detaillierten Zeichnungen [Abb. 244—246] noch nicht vorhanden sind), sind der Teller A und die durch ihn hindurchreichenden Bewegungsstangen sichtbar, mit deren mittelster S die Operationen unter 1) und 2) auszuführen sind. Die Zahnstange, welche die Drehung des Transporteurs bewirkt, liegt in der Zeichnung hinter der mittelsten Welle, ist also nicht sichtbar. Die zwölf kleineren Wellen s vermitteln die Ausführung der unter 4) bezeichneten Bewegungen.

Auf dem Teller A (Abb. 245) ist ein hohles Stativ D D' fest fundiert, welches das Achatlager für die Mittelschneide des Wagebalkens W trägt. Im Innern des Statives sind durch Exzenter an der Mittelwelle vertikal verschiebbar ein Vollcylinder F und ein diesen umschließendes Rohr E. Ersterer trägt eine die Arretierung des Balkens vermittelnde Platte F', letzteres eine zweite Platte E', auf der die Arretierungsstützen für die Gehänge sitzen. Das Rohr E ruht auf 2 identischen Exzentern 2 2, der Vollcylinder F auf einem dritten Exzenter 3 auf der Hauptwelle, so daß durch Drehung der letzteren die Arretierungen des Balkens und der Gehänge nebst den Wageschalen gehoben oder gesenkt werden können. Dieselbe Welle S trägt außerdem noch zwei identische Exzenter 1 zum Heben und Senken des Transporteurs T, der auf jeder Seite eine Plattform mit aus Abb. 243 ersichtlichen Ausschnitten bildet; die kreuzförmigen Wageschalen müssen durch die Ausschnitte hindurch-



244. Teil der Stückrathschen Vakuumwage der Kaiserl. Normal-Eichungs-Kommission.

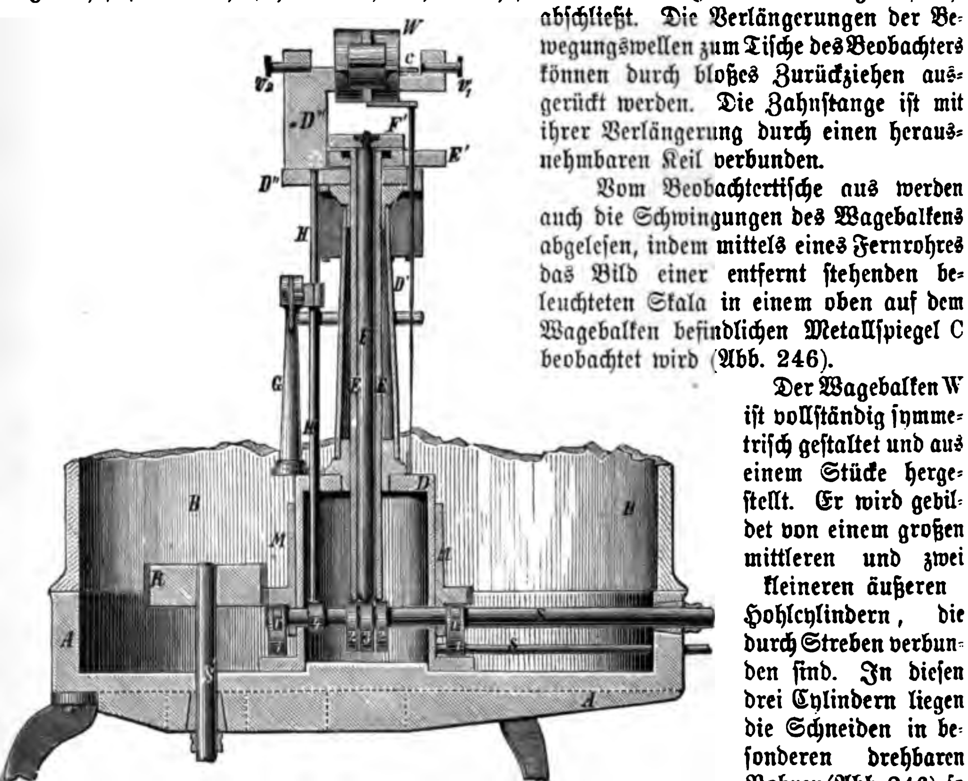
gehen, ohne anzustoßen. So kann beim Senken des Transporteurs ein Gewichtsstück von diesem auf die Gehänge und beim Heben ein Gewichtsstück von den Gehängen auf den Transporteur gesetzt werden.

Die zu vergleichenden Gewichtsstücke werden nicht direkt auf die kreuzförmigen Gehänge, sondern auf Hilfsschalen gesetzt, die gleichzeitig mit den Gewichtsstücken vertauscht werden, um etwaige Beschädigungen der Gehänge durch die Art der Unterstützung zu vermeiden. Das Drehen und Heben des Transporteurs kann nur geschehen, wenn der Balken nebst Gehängen arretiert ist.

Der Mechanismus zum Auflegen der Ausgleichsgewichte ist folgendermaßen eingerichtet (Abb. 244): Durch zwei Hebel K_1 und K_2, deren Drehpunkt in der Säule G des Statives liegt, mit horizontalen Cylindern L_1 und L_2 werden auf beiden Seiten der Wage je fünf Gleitstäbe mit Führungen $u_1, \ldots u_5$ gehoben oder gesenkt, die wieder kleine Reiter von einer aus der Abbildung ersichtlichen Form tragen. Die Träger der Reiter gehen durch gabelförmige Ansätze q an den Gehängen hindurch und setzen beim Senken der Hebel K ihre Reiter auf die Gabeln ab. Die Hebel K werden mittels Exzenter 4 von der

Hauptwelle aus bewegt. Damit nun aber beim Senken der Hebel nur bestimmte Gewichte abgesetzt werden, verriegelt man die zur Ausgleichung der Belastung der Wageschalen nicht gebrauchten Gewichte durch die Riegelstangen n, die sich in entsprechende Kerbe der betreffenden Stäbe u einschieben und sie so am Senken und Absetzen ihrer Gewichte verhindern. Die Riegelstangen werden durch ein Hebelsystem t O horizontal verschoben, das seinerseits durch kleine Exzenter s_1 .... an den zehn Bewegungsstangen bewegt wird.

Die Dichtung der Bewegungswellen erreicht Stückrath dadurch, daß die Wellen, welche in ihre Stopfbuchsen eingeschliffen sind, Drahtspiralen tragen, über welche Gummischläuche gezogen sind, die einmal an der Buchse, das andre Mal an der Welle umschnürt werden, so daß die Spirale sich innerhalb des Schlauches befindet. Wird nun die Welle gedreht, so verdreht sich der Schlauch mit ihr, indem er das Innere der Wage luftdicht abschließt. Die Verlängerungen der Bewegungswellen zum Tische des Beobachters können durch bloßes Zurückziehen ausgerückt werden. Die Zahnstange ist mit ihrer Verlängerung durch einen herausnehmbaren Keil verbunden.



245. Teller der Stückrathschen Vakuumwage der Kaiserl. Normal-Eichungs-Kommission.

Vom Beobachtertische aus werden auch die Schwingungen des Wagebalkens abgelesen, indem mittels eines Fernrohres das Bild einer entfernt stehenden beleuchteten Skala in einem oben auf dem Wagebalken befindlichen Metallspiegel C beobachtet wird (Abb. 246).

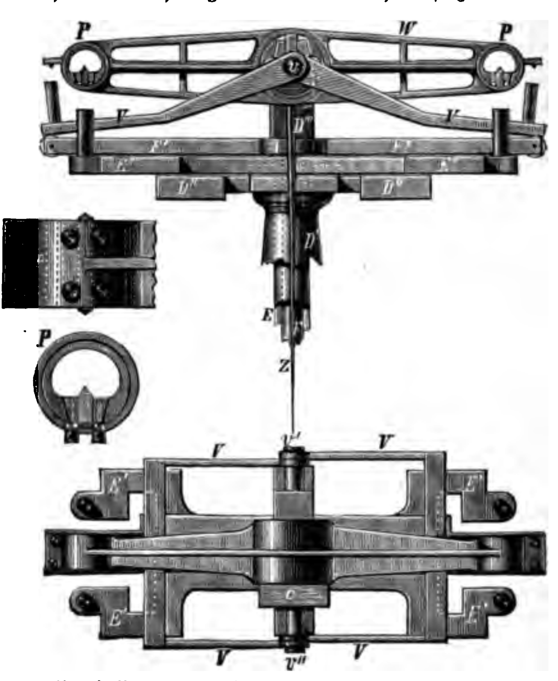
Der Wagebalken W ist vollständig symmetrisch gestaltet und aus einem Stücke hergestellt. Er wird gebildet von einem großen mittleren und zwei kleineren äußeren Hohlcylindern, die durch Streben verbunden sind. In diesen drei Cylindern liegen die Schneiden in besonderen drehbaren Rohren (Abb. 246), so daß sie justiert werden können.

Die Gehänge für die Wageschalen werden durch vierseitige Drahtbügel g (Abb. 244) gebildet, die oben eine Achatpfanne zum Aufsetzen auf die Endschneiden des Wagebalkens tragen und unten mit zum Rahmengestell normalen Stahlschneiden zur Aufnahme der Pfannen der Gewichtsträger versehen sind. Beim Aufsetzen der Gewichtsstücke auf die Wageschalen ist ein Zentrieren der Gewichte nötig, um ein längeres Schwingen der Schalen zu verhindern. Um dies zu erreichen, senken sich an der neuesten Konstruktion der Wage zwei kleine Spitzen, die von der Hauptwelle aus auf und ab bewegt werden, in je einen Hohlkonus an der unteren Fläche der Gewichtsträger. Haben die Schalen infolge exzentrischer Stellung der Gewichte das Bestreben, sich ein wenig schief zu stellen, so kann der betr. Gewichtsträger beim Aufheben der Arretierung mit seinem Hohlkonus langsam an der Spitze entlang gleiten, ohne in Schwingungen zu geraten. Um die Berührung der Schneiden mit den Pfannen möglichst sanft stattfinden zu lassen, ist in dem betreffenden Teil der Drehung der Arretierungswelle ein Vorgelege, bestehend

aus Schnecke und Zahnrad, eingeschaltet. Die Ausgleichsgewichte bestehen aus Stücken von $1\frac{1}{3}$, 1, 3, 9, 27 und 81 mg; $\frac{1}{3}$ mg wird durch die Differenz $1\frac{1}{3} - 1$ mg dargestellt.

Bei feineren Wägungen kommen noch folgende Instrumente zur Bestimmung des Luftgewichts in Anwendung: Thermometer und Hygrometer innerhalb der Glasglocke, und zwar in gleicher Höhe mit den Gewichtsstücken, und Barometer im Beobachtungsraum, bei Vakuumwägungen Manometer, welche mit dem Cylinder in Verbindung stehen.

In Abb. 247 ist die Gesamtaufstellung der Vakuumwage in dem mit Zinkwänden bekleideten Beobachtungssaale der Normal-Aichungs-Kommission gegeben. Von der Vakuumwage ist die Glocke B abgehoben und durch Gegengewichte C äquilibriert. Die Beobachtung erfolgt mittels des Fernrohrs F und der Skala Sc, welche ihre Beleuchtung erhält von der in der Zinkwand befindlichen Beleuchtungslaterne L durch Reflexion von einem System verstellbarer Spiegel Sp. Sämtliche Wägungsoperationen werden von dieser Beobachtungsstelle aus mit den Bewegungswellen S ausgeführt. Das Fernrohr F_2 dient zur Beobachtung der im Wagegehäuse befindlichen Thermometer und Hygrometer, welche durch die Glühlämpchen G beleuchtet werden. M ist das zur Bestimmung des Druckes dienende Manometer.



246. Wagebalken der Stückrathschen Vakuumwage der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission.

Die Genauigkeitsgrenze, bis zu welcher wir bei der Bestimmung der Gewichtseinheit, also des Kilogramm, mit unseren Präzisionswagen ersten Ranges gelangen, beträgt 0,005 mg. Die Genauigkeit bei der Bestimmung kleinerer Gewichte ist natürlich bedeutend größer. Mittels einer von P. Stückrath konstruierten und im Besitz der Normal-Aichungs-Kommission befindlichen Präzisionswage für kleinere Belastungen, bei welcher Balken, Gehänge und Schalen aus Aluminium bestehen und zusammen nur 5 g wiegen, und bei welcher die Schneiden durch je zwei Achatspitzen ersetzt sind, kann man die Gewichte von 1 g abwärts bis auf 0,0001 mg genau bestimmen.

Der außerordentlich hohe Grad konstruktiver Vollkommenheit, welchen die Wage in neuerer Zeit erreicht hat, hat Prof. v. Jolly in München veranlaßt, dieselbe zu einem hochinteressanten Experiment anzuwenden, nämlich mittels derselben die anziehende Wirkung der Materie zu messen. Bekanntlich nimmt die Schwerkraft, also auch der Druck eines Körpers auf seine Unterlage nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz mit dem Quadrate seiner Entfernung vom Erdmittelpunkte ab. Auf einer Wage nun, deren Schalen eine Höhendifferenz von 5,29 m hatten, zeigten 2 Kilogrammstücke, welche, wenn sie sich in gleicher Höhe befanden, genau gleich waren, eine bedeutende Differenz. Das von der Erde entferntere Gewicht zeigte eine Gewichtsabnahme von 1,5 mg, eine mit der nach dem Gravitationsgesetz berechneten nahe übereinstimmende Größe. Wurde ferner unter das eine Kilogramm eine mehrere Zentner schwere Bleikugel gebracht, so zeigte sich auch hier die anziehende Wirkung der Bleikugel, indem das über ihr befindliche Kilogramm um

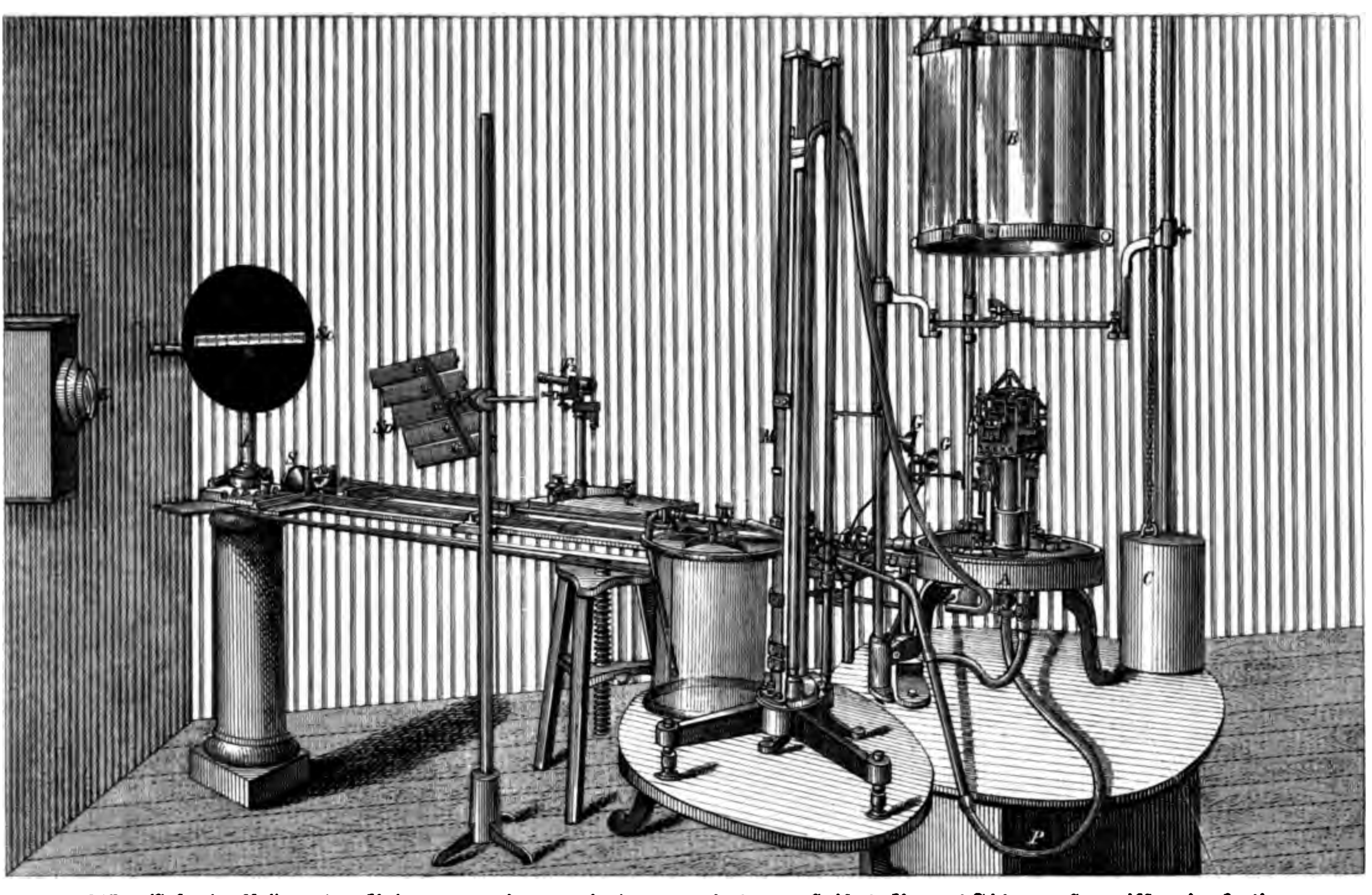
eine meßbare Größe schwerer wurde. Es läßt sich mit Hilfe der chemischen Wage auf diesem Wege indirekt die Dichtigkeit der Erde bestimmen.

Nach dem Vorgange von Jolly sind in der neuesten Zeit Untersuchungen zur Bestimmung der Gravitationskonstante und der mittleren Dichtigkeit der Erde nach einer verbesserten Methode ausgeführt worden von den Prof. A. König und Richarz, an denen sich später Dr. Krigar beteiligte. Diese Versuche wurden auf Kosten der Kgl. Akademie der Wissenschaften mit Unterstützung des Kgl. preußischen Kriegsministeriums, welches die Bleimasse und den Beobachtungsraum in den Kasematten der Festung zu Spandau zur Verfügung stellte, ausgeführt. Sie begannen im Jahre 1884 und wurden 1896 zu Ende geführt. Der angewandte Meßapparat, von den Beobachtern „Doppelwage" genannt, besteht aus einer gewöhnlichen Wage, an deren beiden Schalen vermittelst je einer Stange von 226 cm Länge noch eine zweite, untere Schale hängt. Die Beschleunigung durch die Schwerkraft am Orte der oberen Schale hat nun einen kleineren Wert als am Orte der unteren. Führt man nun zwischen zwei Kilogrammkugeln, von denen sich die eine in der Wageschale links oben und die andere in der Wageschale rechts unten befindet, eine gewöhnliche Gaußsche Wägung aus mit horizontaler Umsetzung von rechts nach links und umgekehrt, so rührt die als Resultat hieraus folgende Gewichtsdifferenz her von der Differenz der beiden Massen und der Differenz der Schwerkraft oben und unten. Wird hierauf die oben befindliche Masse vertikal nach unten, die unten befindliche vertikal nach oben gebracht, und wieder eine Gaußsche Wägung mit Vertauschung in gleichem Niveau ausgeführt, so wird das Resultat dieser Wägung von demjenigen der ersten verschieden sein müssen. Denn während die Differenz der Massen unverändert geblieben ist, hat die Differenz der Schwere durch die vertikale Umsetzung der Massen ihr Zeichen gewechselt. Subtrahiert man also die Resultate der beiden Wägungen, so hebt sich die Massendifferenz heraus und es bleibt übrig die doppelte Abnahme der Schwere zwischen beiden Niveaus. Bei den Gravitationsbestimmungen befindet sich nun zwischen dem oberen und unteren Schalenpaar ein nahezu würfelförmiger Bleiklotz von fast 9 cbm Inhalt und mehr als 100000 kg Masse, in dessen Mitte die Verbindungsstangen der Schalen durch röhrenförmige Aussparungen hindurch gehen. Durch die Anwesenheit dieser großen anziehenden Masse erscheint die Schwere am Orte der oberen Wageschalen um die Attraktion der Bleimasse vermehrt, am Orte der unteren Wageschalen um dieselbe vermindert. Die Abnahme der Schwerebeschleunigung von unten nach oben erscheint daher um die doppelte Attraktion vermindert. Die Kombination zweier Wägungen mit ganz denselben Anfangsstellungen und Vertauschung der Kilogrammkugeln wie ohne Bleiklotz ergibt daher jetzt mit der doppelten Abnahme der Schwere mit der Höhe ein um die vierfache Attraktion des Bleiklotzes vermindertes Resultat. Aus der Vereinigung der Resultate ohne Bleiklotz und mit Bleiklotz findet man also die reine vierfache Attraktion des letzteren, befreit von der irdischen Schwere über und unter demselben. Es ergab sich aus diesen Versuchen, auf welche näher einzugehen den Rahmen unseres Buches überschreiten würde, für die Gravitationskonstante eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus anderen Beobachtungsmethoden und auch für die mittlere Dichtigkeit der Erde ein Wert (nämlich 5,505), welcher mit den von anderen Forschern, wie Cavendish, Reich, Cornu, v. Jolly, Wilsing, Poynting, Boys gefundenen ganz gut übereinstimmt.

Apparate zur Zeitmessung.

Uhren. Stimmgabel. Chronoskop von Hipp.

Was die Zeitmessung betrifft, so bieten sich uns von vornherein zwei verschiedene Aufgaben dar: erstens die Aufgabe, einen Zeitmoment in Rücksicht auf das durch die tägliche Umdrehung unserer Erde bedingte Grundmaß anzugeben, z. B. den Moment des wahren Mittags, d. h. den Moment des Durchgangs des Sonnenmittelpunktes durch den Beobachtungsmeridian, zu bestimmen; dies kann man absolute Zeitbestimmung



247. Gesamtaufstellung der Vakuumwage in dem Beobachtungssaale der Kaiserl. Normal-Aichungs-Kommission in Berlin.

nennen; zweitens die Aufgabe der relativen Zeitmessung, die darin besteht, ein Zeitintervall in bestimmte, übrigens willkürliche aliquote Teile zu teilen, resp. solche Teile von Zeitintervallen mit einander zu vergleichen.

Die Instrumente und Apparate, mit Hilfe deren wir diese Arten von Zeitmessungen ausführen, heißen Zeitmesser, Uhren, Chronometer, Chronoskope. Die ältesten Zeitmesser für absolute Zeitbestimmungen sind die Sonnenuhren, bei denen die Tageszeiten annähernd durch die Bewegung des Schattens eines von der Sonne beleuchteten Körpers bestimmt werden, und für relative Zeitmessungen die Wasseruhren, Quecksilberuhren und Sanduhren, bei denen die Dauer gewisser Zeiträume durch Messung der während derselben aus bestimmten Öffnungen ausgeflossenen Mengen von Wasser, Quecksilber oder Sand ermittelt wurde.

Eine genaue Zeitbestimmung ist aber erst möglich geworden seit der Erfindung der Pendeluhren. Gewöhnlich wird die Priorität dieser wichtigen Entdeckung Huyghens zugeschrieben. Neuere historische Untersuchungen von Gerland haben aber ergeben, daß Galilei die Pendeluhr bereits im Jahre 1641 erfunden, daß diese Entdeckung wegen der gegen seine Person nicht nur, sondern auch gegen seine Schriften eingeleiteten Verfolgungen lange unbekannt geblieben, und daß Huyghens im Jahre 1656, also 15 Jahre später, ohne von Galileis Erfindung zu wissen, dieselbe noch einmal gemacht hat.

Die Einrichtung der Pendeluhren hat seit Huyghens keine prinzipielle Verbesserung erfahren; die Abänderungen beziehen sich nur auf Verbesserungen einzelner Teile, namentlich der Auslösungsvorrichtung, vermittelst welcher der Gang der Uhr durch die Schwingungen des Pendels reguliert wird. Es kann hier nicht auf die zweckmäßigsten Einrichtungen der Suspension, der Hemmung und der Kompensation der Pendeluhren eingegangen werden, zumal dieser Gegenstand an anderer Stelle dieses Werkes seine Behandlung findet. Erwähnt sei hier nur, daß wir heute den täglichen Gang einer Pendeluhr für alle in der Praxis vorkommenden Temperaturen bis auf 0,1 Sekunde genau regulieren, also auch eine absolute Zeitbestimmung bis auf 0,1 Sekunde genau ausführen können, und daß diese Grenze der Genauigkeit der absoluten Zeitbestimmung bedingt ist durch die Unvollkommenheit unserer Sinne. Denn der Gang einer Normaluhr wird durch direkte Beobachtung des scheinbaren Durchganges eines Gestirns durch den Beobachtungsmeridian bestimmt, z. B. etwa dadurch, daß der Beobachter in dem Momente, in welchem ihm der Durchgang des Gestirns durch das Fadenkreuz seines Fernrohrs zu erfolgen scheint, auf einen elektrischen Schlüssel drückt und dadurch den Moment fixiert, der anderseits auch von der Uhr in geeigneter Weise registriert wird. Zwischen dem sinnlichen Eindruck aber und dem Bewußtwerden desselben verfließt eine gewisse Zeit, die für verschiedene Beobachter nicht nur, sondern auch für denselben Beobachter je nach seinem Gemütszustande oder seiner körperlichen Disposition verschieden ist; ihr Wert erreicht die angegebene Größe von 0,1 Sekunde und muß bei genaueren astronomischen Bestimmungen mittels der sogenannten persönlichen Gleichung des Beobachters möglichst berücksichtigt werden. Eine Normaluhr, deren täglicher Gang bis auf 0,1 Sekunde reguliert ist, gibt daher die Einheit des Zeitmaßes, die mittlere Sekunde, die durch die Dauer einer Pendelschwingung dargestellt wird, man kann sagen, bis auf eine unmeßbar kleine Zeitgröße, nämlich im Mittel bis auf $\frac{1}{864\,000}$ Sekunde genau an.

Direkt werden nun von den Pendeluhren in der Regel ganze Sekunden, von den Chronometern bisweilen halbe und auch zwei Fünftel Sekunden angegeben; zur Messung noch kleinerer Zeitintervalle bedient man sich der Chronoskope und in neuerer Zeit häufig der Stimmgabeln, deren Tonhöhe bekanntlich durch die Anzahl ihrer Schwingungen in der Sekunde bestimmt wird.

Von den vielen praktischen Anwendungen der Stimmgabeln zur Messung kleiner Zeitintervalle, z. B. zur Prüfung und Demonstration der Fallgesetze, zur Bestimmung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Pulswelle im menschlichen Körper, möge hier nur die interessante hervorgehoben werden, welche der französische Oberst Sébert in neuerer Zeit gemacht hat, um mit Hilfe derselben die Geschwindigkeit des Geschosses im Geschützrohr

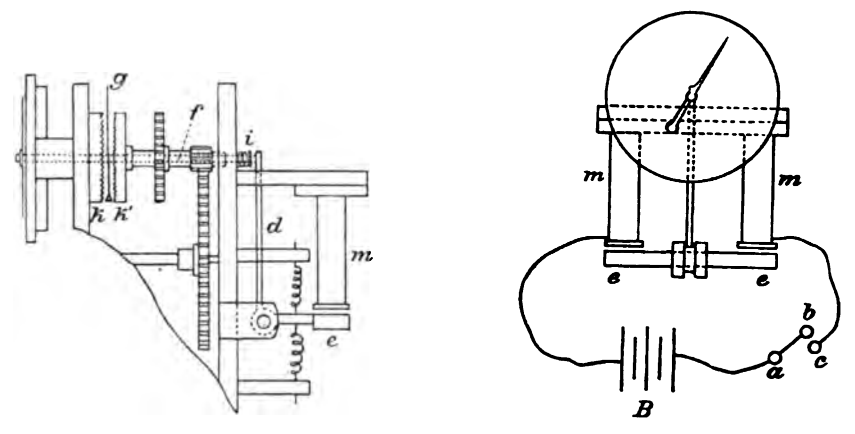
zu bestimmen. Zu dem Ende ist in dem Geschütz eine auf einen schweren Schlitten aufgesetzte, mit einem Schreibstifte versehene Stimmgabel von hoher Schwingungszahl angebracht, welche die Bewegung des Geschosses nicht mitmacht und während derselben ihre durch die Explosion der Pulvergase hervorgerufenen Schwingungen auf eine mit dem Geschosse fest verbundene mit Kienruß geschwärzte Leiste verzeichnet. Die Versuche wurden und werden von unserer Artillerie in Spandau wiederholt, und für dieselben hat der auf dem Gebiete der Präzisionsmechanik rühmlichst bekannte Mechaniker Reichel in Berlin Stimmgabeln von vorgeschriebener Schwingungszahl (2050 Schwingungen pro Sekunde) mit verhältnismäßig lang andauerndem Tone, bis auf einen Bruchteil einer Schwingung genau hergestellt, eine Aufgabe, deren Schwierigkeit nur von dem genügend gewürdigt werden kann, der sich einmal mit dem Abstimmen zweier Stimmgabeln von nur mittlerer Tonhöhe beschäftigt hat. Weiteres über die Anwendung der Stimmgabel als Zeitmeßapparat wird in der Akustik mitgeteilt werden.



248. Hippsches Chronoskop.

Hier soll noch als Zeitmeßapparat zum Messen kleinerer Zeitintervalle das Chronoskop von Hipp in Neuchâtel beschrieben werden, mit dessen Hilfe Zeitintervalle bis auf ein Tausendstel einer Sekunde gemessen werden können. Eine Gesamtansicht desselben ist in Abb. 248 perspektivisch, das Innere des Gangwerkes in Abb. 249 und 250 dargestellt. Das Wesentliche desselben besteht darin, daß das Zeigerwerk unabhängig von dem eigentlichen Uhrwerk, welches durch ein Gewicht P getrieben und durch eine elastische Feder F reguliert wird, angeordnet ist und mit Hilfe eines elektromagnetischen Apparats beliebig in das Uhrwerk eingeschaltet oder aus demselben ausgeschaltet werden kann. Soll die Zeitdauer eines Ereignisses gemessen werden, so muß die elektrische Schaltung so gewählt sein, daß das Zeigerwerk im Momente des Beginnens des Ereignisses in das vorher in Bewegung gesetzte Uhrwerk eingeschaltet und mit dem Ende des Ereignisses wieder ausgeschaltet wird, so daß es also nur während der zu bestimmenden Dauer des Ereignisses an der Bewegung teil nimmt. Das Zeigerwerk enthält zwei Zeiger, von denen der große sein Zifferblatt in 10 Sekunden, der kleine das seinige in 0,1 Sekunde umkreist; da beide Zifferblätter in je 100 Teile geteilt sind, so lassen sich mittels des Apparats Zeitintervalle bis auf 0,001 Sekunde ablesen. Wird der von der Batterie

(2 Daniellsche Elemente) B gelieferte galvanische Strom durch Berührung von b mit c geschlossen, so zieht der Elektromagnet m den Anker e an; durch das Hebelwerk d wird infolgedessen die frei bewegliche Achse f mit dem Uhrzeiger vorgeschoben und ein zweiter auf ihr aufsitzender Zeiger g zum Eingriff in das feste Kronrad k gebracht, welches an der Bewegung des Uhrwerkes nicht teilnimmt; das Zeigerwerk ist dann aus dem Uhrwerk ausgerückt. Wird der Strom geöffnet, so wird der Anker e losgelassen, die freie Achse f wird durch die Feder i zurückgedrückt, der Zeiger g greift in das bewegliche Kronrad k' ein, welches an dem Gange des Uhrwerks teilnimmt, und das Zeigerwerk nimmt gleichfalls am Gange des Uhrwerks teil. Bei der Ausführung einer Versuchsreihe, z. B. zur Bestimmung der Schwingungsdauer eines Magnets (oder zur Bestimmung der Zeit, die ein Körper braucht, von einer gemessenen Höhe herabzufallen), ist nun in folgender Weise zu verfahren. Das Zeigerwerk wird zunächst aus dem Uhrwerk ausgeschaltet und der Stand beider Zeiger abgelesen; dann wird das Uhrwerk durch Fortziehen eines Sperrhakens mittels der Schnur S_1 in Thätigkeit gesetzt, das Zeigerwerk genau im Momente des ersten zu beobachtenden Durchganges des Magnets durch die Gleichgewichtslage mit Hilfe eines



249 u. 250. Gangwerk von Hipps Chronoskop.

elektrischen Tasters in das Uhrwerk eingerückt und im Momente des letzten zu beobachtenden Durchganges wieder ausgerückt, so daß es also nur während der Dauer der Schwingungsbeobachtungen an dem Gange des Uhrwerkes teilnimmt. Die Differenz des letzten Zeigerstandes gegen den ursprünglichen, dividiert durch die Anzahl der Durchgänge, liefert die gesuchte Schwingungsdauer.

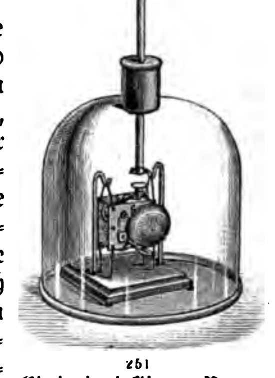
* * *

Aus dem Vorhergehenden ist ersichtlich, daß wir bei der Bestimmung der drei Fundamentalgrößen, der Länge, der Masse und der Zeit, mit unseren Meßmethoden und Meßmitteln nahe an der Grenze des mit unseren Sinnen überhaupt Meßbaren angelangt sind. Es darf uns mit freudiger Genugthuung erfüllen, daß gerade die deutsche Präzisionsmechanik in den letzten beiden Dezennien einen bedeutenden Aufschwung genommen hat, so daß wir hoffen können, durch zweckmäßiges Zusammengehen von Wissenschaft und Technik, sowie durch die Organisation von Staatsinstituten, denen die Leitung gewisser größerer, für den Einzelnen zu kostspieliger und zu schwieriger, für die Hebung der Präzisionsmechanik aber notwendiger, experimenteller Untersuchungen obliegt, auch die Bestimmung der vielen in den verschiedenen Gebieten der Physik gebräuchlichen abgeleiteten Maßeinheiten denjenigen Grad von Zuverlässigkeit und Genauigkeit gewinnen zu sehen, welchen die Bestimmung der drei Fundamentaleinheiten des Raumes, der Materie und der Zeit bereits erreicht hat.

Vom Schall.

Schallwellen. Ihre Fortpflanzung und Geschwindigkeit. Reflexion. Echo. Sprach- und Hörrohr. Ton und Farbe. Tiefste und höchste Töne. Sirenen von Savart, von Seebeck, von Cagniard de la Tour. Fourierscher Satz. Schwingende Saiten. Das Monochord. Intervalle und Tonleitern. Dur und Moll. Helmholtz. Schwingungsknoten an Saiten und Platten. Chladnische Klangfiguren. Obertöne. Klangfarbe der Instrumente. Vokalklänge. Kombinationstone. Tartini und Sorge. Offene und gedackte Pfeifen. Reissches Telephon. Bellsches Telephon. Phonograph. Grammophon. Photophon.

Die Erscheinungen der Außenwelt werden uns durch Vermittelung unserer Nerven im Gehirn, der Nervenzentrale, zum Bewußtsein gebracht, und zwar jede der einzelnen sinnlichen Wahrnehmungen ausschließlich durch die entsprechenden spezifischen Nerven. Das Wesen dieser Vermittelung besteht in der Übertragung gewisser Bewegungsformen auf die Nerven, die ihrerseits auch in molekulare Erzitterungen versetzt werden. Das Abfeuern eines Kanonenschusses versetzt die Luft und alle in der Nähe befindlichen Gegenstände in Erschütterungen. „Die Luft ist die Trägerin des Schalles“, sagt Humboldt in seinem „Kosmos“, „also auch die Trägerin der Sprache, der Mitteilung der Ideen, der Geselligkeit unter den Völkern. Wäre der Erdball der Atmosphäre beraubt, wie unser Mond, so stellte er sich uns in der Einbildung als eine klanglose Einöde dar.“



261. Glocke im luftleeren Raume.

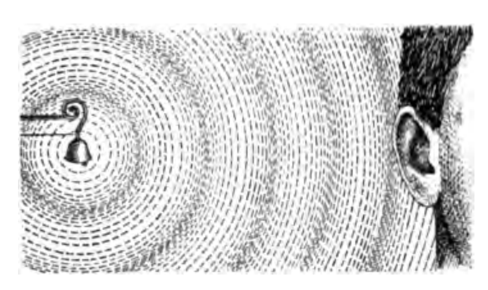
Wie durch einen Stich in die Haut unseres Körpers die in der Nähe befindlichen Gefühlsnerven gereizt werden, und dieser Reiz in unserm Gehirn als Schmerz wahrgenommen wird, wie der Duft der Rose auf unsere Geruchsnerven wirkt, und die dadurch hervorgerufenen molekularen Bewegungen der Geruchsnerven in uns die Empfindung des Wohlgeruches erzeugen, wie ferner unser Auge Lichteindrücke auf die Weise empfindet, daß die Sehnerven durch die wellenartigen Erschütterungen des alles durchdringenden Lichtäthers in entsprechende Erregung versetzt werden, so sind die Eindrücke, die wir durch unser Ohr erhalten, ebenfalls nichts anderes als die Folge von Bewegungen, die durch den Gehörapparat des Ohres den Gehörnerven übertragen und von uns als Schall wahrgenommen werden. Wir hören den Knall eines abgeschossenen Gewehres und können an der gleichzeitig erzitternden Fensterscheibe bemerken, in welche Erschütterung die Luft geraten war, ja wir können die Erschütterungen der Luft selbst, wie zuerst der deutsche Physiker Mach und nach ihm der englische Physiker Vernon Boys gezeigt haben, auf photographischem Wege darstellen.

Alles, was wir hören, pflegen wir mit dem Namen Schall zu bezeichnen, und wir nennen die wellenartigen Bewegungen, die den Schall hervorbringen, Schallschwingungen. Sie bestehen in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft. Dreierlei ist zur Wahrnehmung eines Schalles durchaus erforderlich: ein schallgebender Körper, ein Medium, welches den Schall fortpflanzt, und ein Organ, welches ihn wahrnimmt. Fehlt der schallgebende Körper, so kann man natürlich nichts hören; Ohrensausen und Ohrenklingen sind nur pathologische Erscheinungen. Ebensowenig kann man hören, wenn der Gehörnerv zerstört ist. Mangelt endlich das fortpflanzende Medium, die Luft, so haben wir auch keine Gehörempfindungen. Auf hohen Bergen klingt unsere Stimme schwächer als in der Ebene, weil die Luft dort verdünnter ist. Saussure schoß auf dem Montblanc eine Pistole ab, und der dadurch hervorgerufene Schall hörte sich nicht stärker an, als wenn zwei Holzstücke aufeinander geschlagen werden. Bringen wir unter den Rezipienten einer Luftpumpe eine Glocke oder das Schlagwerk einer Uhr, so hören wir die Glocke so lange hell tönen, als die Luft unter dem Rezipienten nur wenig verdünnt ist. In demselben Maße aber, als die Luft durch das Evakuieren verdünnt wird, vermindert sich auch die Intensität des Schalles, und er wird, obwohl wir das Schlag-

werk funktionieren sehen, ganz unhörbar, wenn der Rezipient leer gepumpt ist. In Abb. 251 ist ein Apparat zur Ausführung dieses Versuches dargestellt, nämlich ein Glasballon, in welchem sich eine Glocke mit Uhrwerk befindet, und welcher auf den Teller einer Luftpumpe gesetzt werden kann.

Die Fortpflanzung der Schallwellen erfolgt gleichmäßig und geradlinig nach allen Seiten, so daß die Oberflächen der einzelnen Wellen immer eine um die Erregungsursache gedachte Schar von Kugeln bilden. Da der Schall nach jedem Punkte in gerader Linie gelangt, so spricht man von Schallstrahlen. Die Schallstärke wird mit wachsender Entfernung von der Schallquelle immer schwächer, und zwar nimmt die Intensität, wie aus einer einfachen mathematischen Betrachtung folgt, mit dem Quadrate der Entfernung ab, so daß ein Pistolenschuß, der 1 m von unserm Ohr entfernt abgefeuert wird, hundertmal so stark auf unser Ohr wirkt, als ein in 10 m Entfernung abgegebener Schuß.

In trockener Luft von der Temperatur 0° C. bewegt sich der Schall mit einer Geschwindigkeit von 331 m in der Sekunde weiter. Dieser Wert war das Ergebnis der berühmten Versuche, welche in der Nacht vom 21. zum 22. Juni des Jahres 1822 vom bureau des longitudes zu Paris ausgeführt wurden, und an welchen unter anderen Arago, Gay-Lussac und Alexander von Humboldt teil nahmen. Auf den beiden südlich von Paris gelegenen Hügeln Villejuif und Montlhéry waren Kanonen aufgestellt, aus denen je zwölf Schüsse in Zeitintervallen von zehn zu zehn Minuten abgefeuert wurden, und zwar auf der einen Station fünf Minuten früher als auf der anderen. Der Himmel war heiter und die Luft ruhig, so daß man das Aufblitzen des Feuers sicher sehen und mittels guter Chronometer die Zeit messen konnte, welche zwischen dem Sichtbarwerden des Feuers und der Wahrnehmung des Schalles verfloß. Dieselbe betrug im Mittel 54,6 Sekunden für die Entfernung von 9549,6 Toisen der beiden Kanonen. Der auf diese Weise gefundene Wert von 331 m für die Schallgeschwindigkeit in trockener Luft wurde durch spätere Versuche bestätigt. Wenn also ein Lichtstrahl, dessen Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft etwa 300 000 000 m in der Sekunde beträgt, um von der Sonne bis zur Erde zu gelangen, 8 Minuten 13 Sekunden braucht, so würde ein Schall — genügende Intensität vorausgesetzt — die Zeit von etwa 14 Jahren gebrauchen, um von der Sonne zur Erde zu gelangen. Durch die Thatsache, daß das Licht sich bedeutend schneller fortpflanzt, als der Schall, erklärt sich manche Erscheinung des täglichen Lebens. Beobachtet man z. B. aus einiger Entfernung einen Holzhauer bei seiner Arbeit, so hört man den Schlag nicht in demselben Moment, in welchem man die Axt auf den Holzblock aufschlagen sieht, sondern erst später, wenn die Axt wieder zum zweiten Schlage emporgehoben wird. Beim Abfeuern einer in größerer Entfernung befindlichen Kanone erblickt man die Lichterscheinung früher, als man den Schuß hört, ebenso wie man beim Gewitter in der Regel den zuckenden Blitz früher sieht, als man den Donner hört.

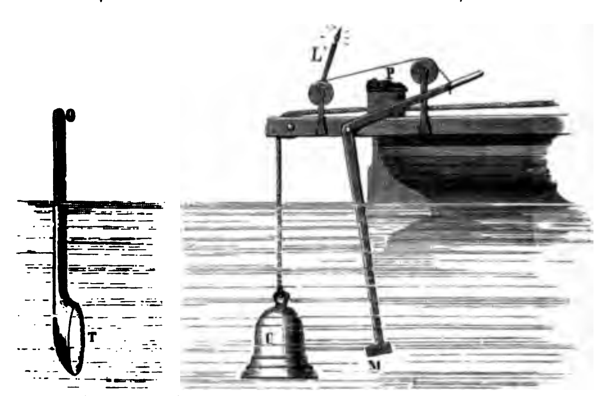

252. Fortpflanzung der Schallwellen in der Luft.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft ist unabhängig vom Drucke, ändert sich aber mit dem Feuchtigkeitsgehalt und mehr noch mit der Temperatur der Luft. Nach den Versuchen von Regnault hängt die Geschwindigkeit, wenn auch nur wenig, von der Stärke des Schalles ab, sie wird mit abnehmender Schallstärke etwas geringer, und weiter haben Regnault und König in Paris gefunden, daß tiefere Töne sich etwas schneller fortpflanzen, als höhere; angenähert aber pflanzen sich alle Töne, welches auch ihre Intensität oder ihre Höhe sei, mit derselben Geschwindigkeit in der Luft fort.

Schallwellen werden aber nicht allein von der Luft weitergeführt; die Erschütterungen pflanzen sich auch durch feste Körper fort, und zwar ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in flüssigen und festen Körpern sogar eine größere als in luftförmigen. Sie ist z. B. in Zinn 8-, in Kupfer 12-, in Eisen, Stahl und Glas 16-, in

verschiedenen Holzarten, und zwar in der Richtung ihrer Fasern 9- bis 13mal so groß als in der Luft. Tannenholz ist infolge seiner Elastizität vorzüglich geeignet, die Schwingungen des Schalles aufzunehmen, deswegen spielt es auch in der Herstellung musikalischer Instrumente eine so bedeutende Rolle. Vorzüglich werden daraus Saiteninstrumente und diejenigen Teile der musikalischen Instrumente hergestellt, die durch ihr eigenes Mitschwingen wirken sollen, während Flöten, Klarinetten und andere Instrumente, deren Körper nicht selbst in Schwingung geraten sollen, aus Ebenholz, Buchsbaumholz, Elfenbein und ähnlichem trägeren Material gefertigt werden. Das Getöse beim Ausbruch des Vulkans Morne Garou auf St. Vincent hörte man bis zum Maracaibosee — 150 deutsche Meilen weit. Der Schall war nicht durch die Luft, sondern durch den Erdboden fortgepflanzt worden. Allgemein ist bekannt, daß die Wilden mit großer Sicherheit das Herannahen des Feindes, seine Marschrichtung und angenähert auch seine Stärke zu erkennen vermögen, indem sie das Ohr auf den Erdboden legen.

Daß sich der Schall in Flüssigkeiten ebenfalls mit großer Leichtigkeit fortpflanzt, wird jeder schon beim Baden zu beobachten Gelegenheit gehabt haben. Abb. 253 stellt eine Versuchsanordnung dar, nach welcher von Colladon und Sturm im Jahre 1827 die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls im Wasser, und zwar im Genfer See, gemessen wurde. Die Glocke C wird auf der einen der beiden Stationen, deren Entfernung genau bestimmt ist, durch den Hammer M zum Tönen gebracht. Dies geschieht durch einen Hebel, der mittels eines über eine Rolle laufenden Fadens P mit einer beweglichen Lichtquelle L derart verbunden ist, daß die letztere eine Ausweichung macht, wenn der Hammer zum Anschlagen gebracht wird. Der Beobachter auf der zweiten Station, der durch ein Hörrohr T die Schallwellen auffängt, sieht natürlich die Bewegung des Lichtes viel früher, als er den Schall hört. Aus dem Zeitintervall, welches verfließt zwischen dem Sichtbarwerden der Lichtbewegung und der Wahrnehmung des Schalls einerseits und der Entfernung der beiden Stationen andererseits, läßt sich die Schallgeschwindigkeit leicht berechnen. Die Versuche ergaben für dieselbe den Wert von 1435 m.



253. Messung der Schallgeschwindigkeit im Wasser.

Reflexion des Schalles. Treffen Schallwellen auf entgegenstehende Hindernisse, so werden sie durch dieselben mannigfach beeinflußt. Leicht bewegliche, aber wenig elastische Körper geben die Erschütterung, welche sie aufnehmen, nur sehr unvollständig weiter. In Räumen, in welchen wollene Decken, Teppiche, Vorhänge u. s. w. ausgebreitet sind, werden Gespräch und Musik stark gedämpft. Sie lassen weder die Wellen vollständig hindurch, noch werfen sie dieselben kräftig genug zurück. Harte elastische Körper dagegen reflektieren die Schallstrahlen, und zwar nach denselben Gesetzen, wie etwa Billardkugeln von den Billardbanden zurückgeworfen oder Lichtstrahlen von spiegelnden Flächen reflektiert werden; nur sind die Schallwellen viel länger und gebrauchen zu ihrer Weiterbewegung ungleich mehr Zeit als die Lichtwellen.

Befindet sich die reflektierende Wand in gewisser Entfernung von uns und zugleich von der Schallquelle, so daß der Schall eine merklich größere Zeit gebraucht, um auf dem gebrochenen Wege in unser Ohr zu gelangen, oder mit anderen Worten, verfließt eine gewisse Zeit zwischen der Ankunft der direkten und der von der Wand reflektierten Schallwellen, so hören wir die letzteren für sich und später als die direkten und nennen diese Erscheinung ein **Echo**. Befindet sich die reflektierende Wand 331 m von uns entfernt,

so werden wir das Echo, da der reflektierte Schall sich mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzt, wie der direkte, nach zwei Sekunden hören. Unter günstigen Umständen kann ein solches Echo nicht nur Worte, sondern ganze Sätze wiederholen, und namentlich sind die Gegenden der Quadersandsteinformation mit den regelmäßigen, steil abfallenden großen Wänden, wie in der Schweiz z. B. auf der Wengernalp und bei Rosenlaui im Haslithale, im Riesengebirge bei Adersbach, auch in der Sächsischen Schweiz u. s. w., durch zahlreiche Echos ausgezeichnet — zum nicht geringen Verdrusse der Reisenden; denn an manchen Stellen der herrlichsten Alpenpässe ist die Erzeugung von Echos geradezu zu einem Unfuge ausgeartet, indem die Reisenden in aufdringlicher Weise durch Alphorn- oder Posaunentöne oder gar durch Böllerschüsse auf Schritt und Tritt belästigt werden. Bekannt ist das Echo in einem kleinen Saale des Schlosses Sanssouci bei Potsdam, in welchem durch einmaliges lautes Händeklatschen der Eindruck lang anhaltenden knatternden Gewehrfeuers hervorgerufen wird. Berühmt ist ferner das Echo am Lurleifelsen, und ganz besonders dasjenige im Schlosse Simoneta bei Mailand; durch das Abprallen des Schalles an den verschiedenen Flügeln dieses Schlosses wird ein aus den Fenstern des Hauptgebäudes abgefeuerter Schuß etwa 50mal gehört.

Durch gekrümmte Flächen können die einzelnen Schallstrahlen ebenso gesammelt werden, wie Lichtstrahlen durch Hohlspiegel vereinigt werden; man macht hiervon einen wichtigen Gebrauch bei der Anlage von Konzertsälen, Theatern und ähnlichen Gebäuden. Sälen für Chorgesang gibt man häufig im Grundriß, sowie im Längs- und Querschnitt die Form einer Ellipse.

Bekanntlich besitzt eine Ellipse zwei Brennpunkte, d. h. zwei Punkte von der Eigenschaft, daß alle Strahlen, welche von dem einen derselben ausgehen, von der Ellipsenwand so reflektiert werden, daß sie in dem anderen Punkte wieder zusammentreffen. Ein leises Flüstergespräch, welches an der Stelle des einen Brennpunktes eines elliptisch gewölbten Raumes geführt wird, kann deshalb deutlich an der Stelle des zweiten Brennpunktes gehört werden. Die Bauart der verräterischen Treppen und Fensternischen in Sälen alter Schlösser beruht auf dieser Eigenschaft der Ellipse; ähnlich eingerichtet ist auch das berühmte Ohr des Dionys, ein zu einem Gefängnis eingerichteter Steinbruch, in welchem, wie erzählt wird, die Staatsgefangenen nicht haben sprechen können, ohne daß ihr Gespräch an bestimmter Stelle deutlich gehört wurde. Weiter wird erzählt, daß in einer Kirche Siziliens der Beichtstuhl so aufgestellt war, daß das nur für den Beichtvater bestimmte, im Flüsterton abgegebene Geheimnis der Beichtenden durch Reflexion von der ellipsoidischen Decke in einem weit entfernten Punkte der Kirche von Unberufenen gehört werden konnte.

Bekannt sind auch die Flüstergrotten im Klosterpark von Oliva bei Danzig; sie befinden sich in den Brennpunkten eines Ellipsoids, so daß man ein in der einen Grotte geführtes Flüstergespräch deutlich in der anderen Grotte hören kann, während auf dem beide Grotten verbindenden Wege nichts von dem Gespräche zu vernehmen ist.

S p r a c h r o h r u n d H ö r r o h r. Wenn Schallwellen immer so von den einschließenden Wandungen reflektiert werden, daß sie nur nach einer Richtung hin sich ausbreiten können, so wird ihre Intensität nach dieser Richtung am stärksten sein. B i o t, der berühmte französische Physiker, hat hierüber an Wasserleitungsröhren in Paris Versuche ausgeführt. Er stellte sich in einer stillen Nacht an dem einen Ende einer 900 m langen Röhre auf und ließ an dem anderen Ende sprechen, verschiedene Instrumente spielen und Geräusche in jeder möglichen Stärke hervorbringen; er fand, daß auf diese lange Strecke hin die Schallwellen nichts von ihrer Intensität verloren; der leiseste Ton wurde vernommen, und das einzige Mittel, gar nichts zu vernehmen, war, wie er sich ausdrückt, vollkommene Stille auch am anderen Ende herrschen zu lassen.

Seit langer Zeit sind von diesen Thatsachen Anwendungen im Sprach- und Hörrohr gemacht worden. In einem alten, 1516 aus dem Arabischen übersetzten, zu Rom gedruckten und fälschlich dem Aristoteles zugeschriebenen Buche wird erwähnt, daß Alexander der Große ein Horn gehabt habe, mit dem er sein Heer bis auf 100 Stadien Entfernung zusammenrufen konnte; dies dürfte aber wohl ebensowenig wie das vom Ritter Roland

im Thal von Ronceval benutzte Horn ein eigentliches Sprachrohr gewesen sein, sondern nur ein gewöhnliches Kriegshorn. Ein Sprachrohr hat zuerst der Ritter Samuel Morland im Jahre 1670 erfunden; er stellte in Gegenwart König Karls II. von England und des Prinzen Robert zu Deal Versuche an, bei denen er sich eines aus Kupferblech hergestellten abgestumpften Kegels von 1,68 m Länge bediente, welches an dem einen Ende einen Durchmesser von 5 cm, an dem anderen einen solchen von 52 cm besaß. Der Schall der Stimme bei Anwendung dieses Sprachrohrs war auf 3 englische Meilen vernehmbar. Zwanzig Jahre früher schon hatte der bekannte Athanasius Kircher eine Vorrichtung angegeben, um Schwerhörigen das Verständnis gesprochener Worte zu ermöglichen; dieselbe bestand ebenfalls aus einem kegelförmigen Rohre, dessen spitzes Ende in das Ohr gesteckt wurde, während in den erweiterten Schalltrichter hineingesprochen wurde. Erst später hat Kircher darauf aufmerksam gemacht, daß dieses Hörrohr auch als Sprachrohr zu gebrauchen ist, wenn man es umkehrt und in das spitze Ende hineinspricht.


254. Das Hörrohr.

Heutzutage hat das Sprachrohr nur geringe Bedeutung; man wendet es noch an auf Schiffen, hohen Bergen oder Türmen, um Bestellungen und Ankündigungen nach untenhin zu machen, in Form von Schallröhren auch in Gebäuden, um durch verschiedene Räume miteinander kommunizieren zu können. Mit zwei solchen Rohren, wie sie durch Abb. 254 und 255 dargestellt sind, kann man sich im Freien bei ruhiger Luft auf 1000 m Entfernung verständigen.

In neuester Zeit findet das Sprachrohr wieder Verwendung beim Phonographen.

Das Hörrohr dagegen hat einen dauernden Wert: es ist gewissermaßen fürs Ohr das, was die Brille fürs Auge ist. Es besteht aus einer konischen Röhre mit erweiterter Schallöffnung, ähnlich einem Horn, und hat den Zweck, eine größere Menge von Schallwellen aufzunehmen und dieselben gewissermaßen konzentriert dem Ohre zuzuführen. Seinen Zweck erfüllt es aber nur bei solchen Personen, welche noch nicht in hohem Grade schwerhörig sind und noch stärkere Eindrücke aufzunehmen vermögen. Ein außerordentlich geeignetes Material für die Herstellung von Hörrohren bildet die Guttapercha, deren Biegsamkeit eine leichte Handhabung gestattet; durch passende Vereinigung mehrerer Schallbecher mit einem Hauptrohr ist es möglich, einen Schwerhörigen an der Unterhaltung selbst eines größeren Gesellschaftskreises teilnehmen zu lassen.


255. Sprachrohr.

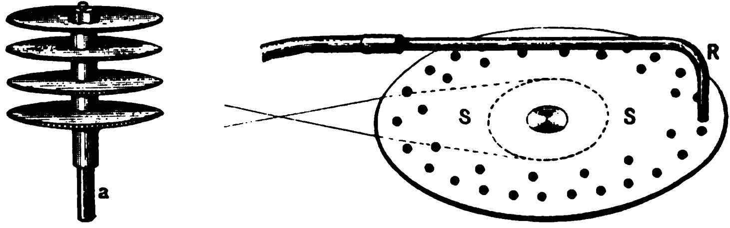
Der Ton. Wir haben bisher die Fortpflanzung einer einzelnen Schallwelle in der Luft betrachtet und auf die Analogie mit der Fortpflanzung des Lichts hingewiesen. Eine Explosion, ein Kanonenschuß, das Rasseln eines Wagens, das Rollen des Donners rufen in uns Schallempfindungen hervor, die wir mit allgemeinen Lichteindrücken, mit dem Aufblitzen einer Rakete, dem durch Spiegelung plötzlich in unser Auge geworfenen Sonnenlicht und Ähnlichem vergleichen können. Wir werden die Analogie noch weiter führen können und sehen, daß sich ein musikalischer Ton zu der allgemeinen Schallempfindung, die ein Geräusch in uns hervorruft, wie ein bestimmter Farbenton zum allgemeinen Lichteindruck verhält.

Ein Geräusch entsteht durch eine unregelmäßige Aufeinanderfolge von Erschütterungen, welche unseren Gehörnerv treffen, ein musikalischer Ton durch regelmäßig und in genau gleichen Zeitintervallen rasch auf einanderfolgende, periodische Erschütterungen. Periodisch nennen wir eine Bewegung, welche sich in derselben Weise und in derselben Zeit wiederholt. Das einfachste Beispiel einer periodischen Bewegung sind die Schwingungen eines Pendels, die in vollkommener Regelmäßigkeit auf einander folgen und periodisch Luftstöße hervorbringen. Indessen folgen diese Luftstöße nicht rasch genug aufeinander, um unseren Gehörnerv erregen zu können. Erst wenn die Stöße, welche die Luft in

Schwingung versetzen, regelmäßig und hinreichend schnell sich wiederholen, wird ein Ton erzeugt. Der Ton sättigt uns ebenso wie die Farbe mit einer bestimmten angenehmen Empfindung, während die Wirkung des Geräusches auf unser Ohr eine unangenehme ist, vergleichbar etwa mit dem Eindruck eines grellen Lichtscheins auf unser Auge. Wir sehen auch hier wieder, daß das Willkürliche der Schönheit entbehrt, und daß letztere in der Ordnung, Harmonie und Gesetzmäßigkeit besteht.

An einem musikalischen Ton unterscheiden wir dreierlei Merkmale, seine Höhe, seine Stärke und seine Klangfarbe. Die Höhe eines musikalischen Tones ist bedingt durch die Anzahl der Stöße oder der Schwingungen, welche in der Sekunde erfolgen; der Ton ist um so höher, je mehr Schwingungen in einer Sekunde erfolgen. Die Tonstärke hängt ab von der Weite oder Amplitude der Schwingungen. Unter Klangfarbe endlich faßt man die charakteristischen Merkmale zusammen, durch welche Töne einer und derselben Höhe, je nachdem sie verschiedenen Instrumenten entlockt werden, abgesehen von ihrer Stärke, sich von einander unterscheiden. Die Klangfarbe des sogenannten Kammertons a ist stets eine andere, wenn er von der menschlichen Stimme gesungen, oder auf dem Klavier angeschlagen, oder auf der Violine gespielt oder auf der Flöte angestimmt wird.

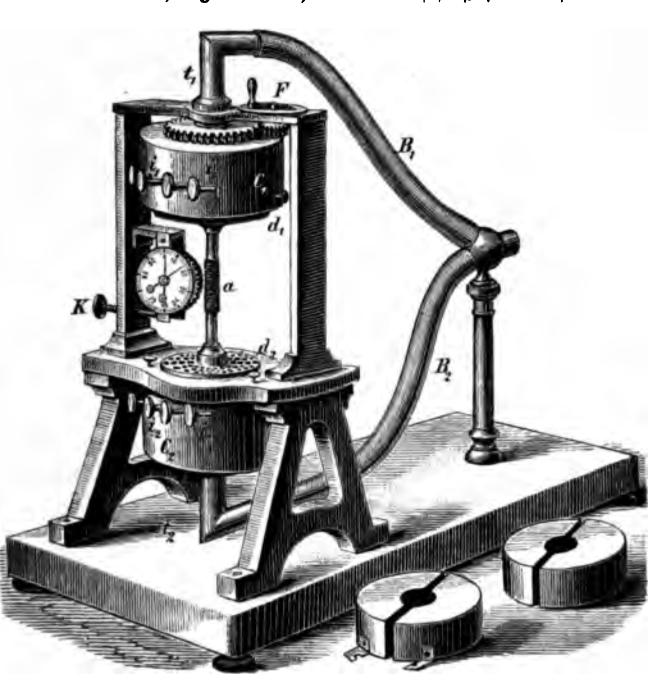
Der experimentelle Nachweis dafür, daß die Höhe eines musikalischen Klanges nur von der Anzahl der in einer bestimmten Zeit erfolgenden Stöße oder Schwingungen abhängt, kann mittels eines Apparates geführt werden, der den schönen Namen Sirene



256. Savarts Zahnradsirene. 257. Seebecks Sirene.

führt, obwohl das, was er dem Auge oder dem Ohre darbietet, nicht gerade als verführerisch schön bezeichnet werden kann. Der Engländer Robert Hooke hat bereits im Jahre 1681 gezeigt, daß ein musikalischer Ton entsteht, wenn man ein Kartenblatt die Zähne eines schnell rotierenden Rades berühren läßt, und der französische Physiker Savart hat diesen Versuch mit der nach ihm benannten Zahnradsirene wiederholt. Auf einer Achse a (Abb. 256), welche mittels einer Zentrifugalmaschine in schnelle Rotation versetzt werden kann, sind vier Räder fest aufgesetzt, deren Zahnzahlen in verschiedenen Verhältnissen zu einander stehen. Berührt man bei konstant bleibender Umdrehungsgeschwindigkeit die einzelnen Räder der Reihe nach mit einem Kartenblättchen, so liefern die Räder einen um so höheren Ton, je mehr Zähne sie besitzen, je mehr Stöße also in derselben Zeit gegen das Kartenblättchen ausgeübt werden. Erhöht man die Umdrehungsgeschwindigkeit, so werden die Töne gleichmäßig höher, vermindert man sie, so werden die Töne tiefer. Bei zu geringer Umdrehungsgeschwindigkeit hört man wohl noch die einzelnen Schläge der Zähne gegen das Blättchen, sie folgen indessen zu langsam auf einander, um von uns noch als Ton wahrgenommen werden zu können. Mindestens 30 Stöße müssen in 1 Sekunde erfolgen, um den Eindruck eines Tones hervorzurufen. Als tiefes C bezeichnet man in der Musik den Ton, welcher 32 Schwingungen in der Sekunde macht; das ist etwa die Grenze, bis zu welcher das menschliche Ohr nach der Tiefe hin Töne zu unterscheiden vermag. Langsamere Schwingungen werden nur als vereinzelte Luftstöße wahrgenommen. Der höchste Ton, den wir zu hören vermögen, entsteht durch etwa 30000 Schwingungen in der Sekunde. Darüber hinaus besitzt unser Ohr nicht mehr die Fähigkeit, Töne aufzufassen, während die Gehörorgane mancher Tiere eine bei weitem größere Empfindlichkeit für noch höhere Töne zu besitzen scheinen.

Eine andere für diese Versuche geeignetere Form der Sirene ist von Seebeck angegeben worden: Eine kreisförmige Papp- oder Metallscheibe SS (Abb. 257), welche mit einer oder mit mehreren zum Scheibenumfang konzentrischen Löcherreihen derart versehen ist, daß die Löcher einer Reihe gleichen Abstand von einander haben, kann mittels einer Zentrifugalmaschine in schnelle Rotation versetzt werden. Über einer der Löcherreihen befindet sich eine Röhre R, aus welcher mittels eines Blasebalges Luft gegen die rotierenden Löcher geblasen werden kann. Auf diese Weise erfolgen rasch auf einander Luftstöße, welche periodische Schwingungen der Luft erzeugen, die sich bei hinreichend schneller Rotation zu einem musikalischen Klange vereinigen. Die Höhe des Tones bleibt dieselbe, solange die Umdrehungsgeschwindigkeit der Scheibe konstant ist. Steigert man diese, so wird der Ton höher, verringert man sie, so wird der Ton tiefer. Ist m die Anzahl der Löcher einer Reihe, so erfolgen bei einer Umdrehung der Scheibe m Luftstöße, und finden in 1 Sekunde n ganze Umdrehungen der Scheibe statt, so erfolgen in 1 Sekunde m mal n Luftstöße. Von der durch das Produkt m · n dargestellten Schwingungszahl ist also die Tonhöhe abhängig.



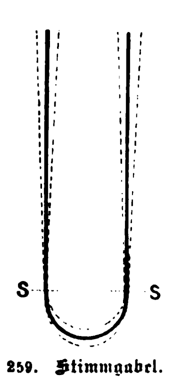
258. Doppelsirene nach Helmholtz mit Zählwerk.

Es besteht nun ein inniger Zusammenhang zwischen den harmonischen musikalischen Intervallen je zweier Klänge und ihren Schwingungszahlen. Enthält die erste Reihe doppelt so viel Löcher als die zweite, und bläst man bei konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit beide Löcherreihen nach einander an, so gibt die erste Löcherreihe die höhere Oktave des Tones, welchen die zweite Löcherreihe liefert. Dem Intervall einer Oktave entspricht das Verhältnis der Schwingungszahlen 1:2. Ist das Verhältnis der Schwingungszahlen zweier Töne 2:3, so bilden sie eine Quinte, ist es 3:4, so bilden sie eine Quarte.

Ein bei weitem vollkommenerer Apparat für die Bestimmung der Schwingungsanzahl eines Klanges ist die Cagniard de la Toursche Sirene (Abb. 258), welche folgende Einrichtung hat. Zwei Messingröhren t_1 und t_2, welche durch die beiden Schläuche B_1 und B_2 mit einem Blasebalge in Verbindung stehen, führen zu den Messingcylindern C_1 und C_2, deren Deckel von vier konzentrischen Reihen von Löchern durchbohrt sind, und zwar enthalten die Reihen des unteren Deckels in gleichen Abständen von einander 8, 10, 12, 16, diejenigen des oberen Deckels 9, 12, 15, 18 Löcher. Bläst man mittels des Blasebalgs durch die Röhren t_1 und t_2 Luft in die Cylinder, so entweicht dieselbe durch die Löcher. Diese sind indessen nicht ganz frei durchgängig, sondern es befinden sich unmittelbar vor den Deckeln zwei ebenso durchlöcherte Messingscheiben d_1 und d_2, welche an einer Achse a befestigt sind, die sich mit feinen Spitzen in fein polierten Stahllagern mit äußerst geringer Reibung drehen kann. Liegen die Löcher der Scheiben gerade vor den Löchern der Deckel, dann kann durch dieselben die Luft frei austreten. Gelangen aber bei der Drehung der Achse undurchbrochene Stellen der Scheiben vor die Löcher der Deckel, so kann die Luft nicht frei austreten. Auf diese Weise wird der eintretende Luftstrom in einzelne Luftstöße zerlegt, welche, wenn sie hinreichend schnell auf einander folgen, sich zu einem musikalischen Ton vereinigen. Die Umdrehung der Achse a, deren Scheiben den Luftstrom abwechselnd unter-

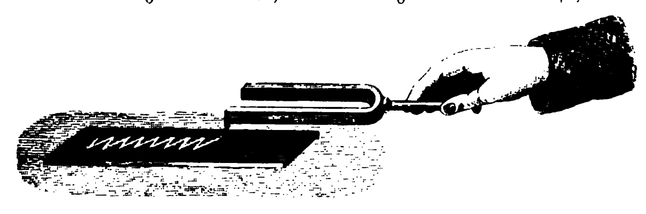
brechen, wird durch den Luftstrom selbst bewirkt. Zu diesem Zwecke sind die Löcher in den Deckeln schräg gebohrt, und ebenso, aber im entgegengesetzten Sinne, sind die korrespondierenden Löcher der beiden Scheiben schräg gebohrt, so daß die Luft aus den Löchern der Cylinder in seitlich gerichteten Strömen austritt, welche gegen die Scheiben d_1 und d_2 stoßen und sie in Rotation versetzen. Durch einen konstanten Luftstrom läßt sich innerhalb weiter Grenzen eine konstante Umdrehungsgeschwindigkeit erzielen, und die in einer bestimmten Zeit stattfindende Anzahl der Umdrehungen kann mittels eines Uhrwerks bestimmt werden, welches durch den Knopf K zu bestimmten Zeitpunkten ein- und ausgerückt werden kann. Unter jeder der Deckelplatten befindet sich weiter ein ebenfalls durchlöcherter Ring, welchen man mittels der Stifte i_1, i_1 resp. i_2, i_2 so stellen kann, daß entweder die korrespondierende Löcherreihe der Deckelplatte mit dem Innern des Cylinders kommuniziert oder abgeschlossen ist, so daß man also jede beliebige der acht Löcherreihen der Sirene entweder einzeln, oder je zwei, je drei zusammen, kurz alle möglichen Kombinationen derselben durch Anwendung der zugehörigen Stifte i anblasen kann.

Öffnet man durch Verstellung des zugehörigen Stiftes i_2 zunächst die Reihe mit acht Löchern im unteren Cylinder, so hört man beim Anblasen des Instruments anfänglich nur die einzelnen Luftstöße, welche mit wachsender Umdrehungsgeschwindigkeit immer schneller und schneller auf einander folgen, bis sie einen dumpfen Ton hervorbringen, der bei gesteigerter Umdrehungsgeschwindigkeit an Höhe und Stärke zunimmt. Nehmen wir an, die Geschwindigkeit sei so reguliert, daß 33 Umdrehungen in der Sekunde stattfinden, so würden, da bei jeder Umdrehung acht Luftstöße erfolgen, in einer Sekunde achtmal 33 oder 264 Luftstöße erfolgen; diese Schwingungsanzahl entspricht dem einmal gestrichenen $\bar{c}$ unserer musikalischen Skala. Öffnen wir die Reihe mit 16 Löchern, so würden bei derselben Umdrehungsgeschwindigkeit 16mal 33 oder 528 Luftstöße in der Sekunde erfolgen, wir würden die höhere Oktave, also das zweimal gestrichene c unserer musikalischen Skala erhalten; bei gleichzeitiger Öffnung der beiden Reihen würden wir also den Zusammenklang einer Oktave, bei gleichzeitiger Öffnung der beiden Löcherreihen mit acht und zwölf Löchern, deren Anzahl sich wie 2 : 3 verhält, würden wir den Zusammenklang einer Quinte, bei gleichzeitiger Öffnung der oberen Reihen mit neun und der unteren mit 12 Löchern (3 : 4) würden wir den Zusammenklang einer Quarte erhalten u. s. f.



259. Stimmgabel.

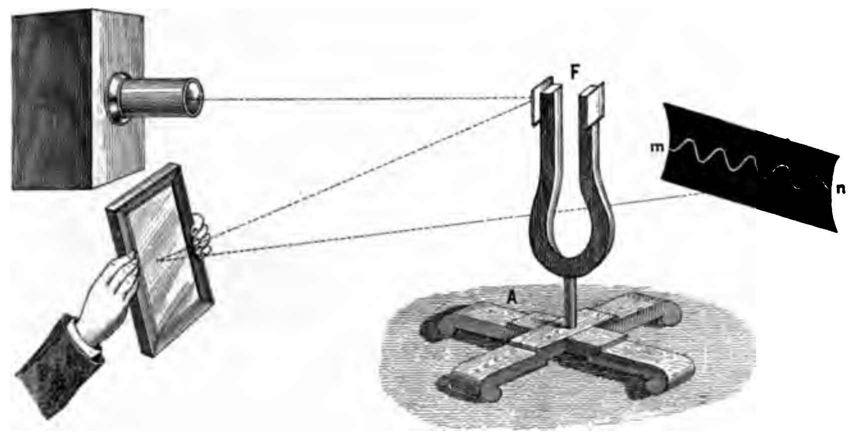
Die von Cagniard de la Tour angegebene einfache Sirene besaß nur eine Löcherreihe, Dove vervollkommnete sie durch Anwendung von vier Löcherreihen, und Helmholtz kombinierte zwei Dovesche Sirenen zu der oben beschriebenen Doppelsirene. Letztere ist noch mit einer Vorrichtung versehen, welche es ermöglicht, den oberen Cylinder selbst entweder im gleichen oder im entgegengesetzten Sinne mit der rotierenden Scheibe d, in Rotation zu versetzen. Dies geschieht mittels des Kurbel- und Zahnradgetriebes F. Dreht man, während eine Löcherreihe des oberen Cylinders bei konstanter Rotationsgeschwindigkeit angeblasen wird, die Kurbel F so, daß die Löcher im Cylinder entgegengesetzt laufen, wie die Löcher der darunter befindlichen Scheibe, so gehen offenbar die einzelnen Löcher schneller an einander vorüber, wie wenn der Cylinder C_1 in Ruhe bleibt; der Ton wird also bei dieser Drehung des Kurbelgetriebes ein höherer, bei entgegengesetzter Drehung ein tieferer sein, wie bei ruhendem Cylinder. Auf dieser Wirkung beruht die bekannte, zuerst von dem holländischen Physiker Buys Ballot experimentell bestätigte Wahrnehmung, daß der Pfiff einer Lokomotive unter sonst gleichen Umständen einen höheren Ton hat, wenn die Lokomotive sich nähert, und wenn sie sich entfernt, einen tieferen, als wenn sie stille steht. Im ersteren Falle werden die vom Pfiff verursachten Schallwellen verkürzt, so daß in gegebener Zeit eine größere Anzahl von ihnen ins Ohr gelangt, während im zweiten Falle das Gegenteil stattfindet.


260. Aufzeichnung der Schwingungen einer Stimmgabel.

Übrigens wissen wir, daß zur Erzeugung eines musikalischen Tones jeder elastische Körper geeignet ist, der durch rasch auf einander folgende periodische Schwingungen die Luft, durch Verdünnung und Verdichtung derselben, in entsprechende Wellenbewegung zu

setzen vermag. Schlägt man eine Stimmgabel oder Glasglocke an oder streicht man dieselben mit dem Violinbogen (s. Abb. 261), so tönen sie. Durch das Anschlagen, resp. das Anstreichen sind Stimmgabel oder Glocke in Schwingungen versetzt worden, welche infolge der Elastizität des Stahles oder des Glases gleichmäßig und anhaltend fortdauern, und welche man leicht sehen und fühlen kann, wenn man den Stiel der Stimmgabel an die Zähne hält oder den Rand der Glocke mit der Fingerspitze berührt; ja man kann die pendelartigen Schwingungen der Stimmgabel von ihr selbst verzeichnen lassen, wenn man an die eine Zinke derselben einen Stift befestigt und die Stimmgabel, nachdem man sie erregt hat, in gerader Linie über eine berußte Glasplatte hinwegzieht (Abb. 260). Würde die Stimmgabel nicht schwingen, dann würde die Spitze beim Hinwegziehen über die berußte Glasplatte offenbar auf ihr eine gerade Linie beschreiben; schwingt die Stimmgabel aber und mit ihr der Schreibstift, so verzeichnet er auf der Glasplatte eine wellenförmige Linie, welche in der Mathematik Sinuskurve genannt wird.

Um eingehender die Bewegungsform der Tonschwingungen untersuchen zu können, sind Methoden ersonnen worden, besonders durch den französischen Physiker Lissajous, welche es ermöglichen, die Schwingungen einer Stimmgabel zur sichtbaren Darstellung zu bringen. Zu diesem Zweck ist an das Ende der einen Zinke der Stimmgabel A (Abb. 261) ein



261. Objektive Darstellung der Schwingungen einer Stimmgabel.

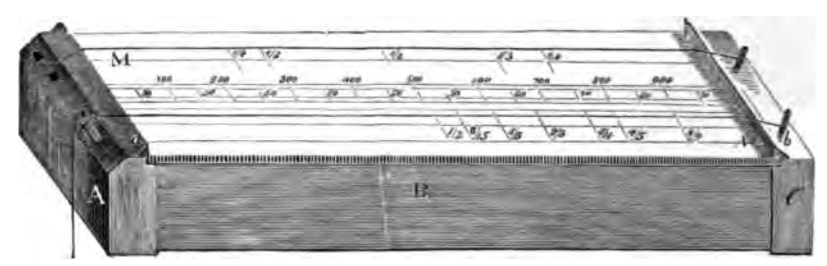
kleiner Spiegel F befestigt, welcher das Licht einer stark beleuchteten kleinen Kreisöffnung als einen kleinen hellen Kreis zurückstrahlt, solange die Stimmgabel nicht schwingt. Dies Bild kann durch einen zweiten Spiegel aufgefangen und von ihm auf den Schirm m n geworfen werden. Wird die Stimmgabel nun in Schwingungen versetzt, so erhält man anstatt des leuchtenden Kreises einen vertikalen Lichtstreifen, solange der zweite Spiegel seine Lage unverändert beibehält. Dreht man ihn aber so, daß der von ihm reflektierte Lichtstrahl über den Schirm von links nach rechts hingleitet, so geht der vertikale Lichtstreifen in eine glänzende Wellenlinie über. Anstatt des Handspiegels wollen wir uns nun eine zweite Stimmgabel, deren eine Zinke ebenfalls mit einem kleinen Planspiegelchen versehen ist, schwingend vorstellen, aber nicht in derselben Richtung wie die erste, sondern etwa senkrecht gegen jene, indem sie horizontal gehalten wird, während die Schenkel der ersten vertikal stehen. Je nach dem Schwingungsverhältnis der beiden Stimmgabeln erhält man dann auf diese Weise Kurven von größter Mannigfaltigkeit, welche für die mathematische Untersuchung ebenso interessant wie wichtig sind.

Die Luft kann durch die verschiedensten Mittel in periodische Schwingungen versetzt werden. Eine gespannte Saite wird durch den harzigen Bogen aus ihrer Ruhelage gezogen; sie strebt wieder in dieselbe zurückzukehren, da erfaßt sie aufs neue der Bogen, nimmt sie mit fort, bis sie wieder zurückschnellt, und so macht sie ihre Bewegungen Hunderte, ja Tausende von Malen in der Sekunde, und jeder Hin- und Rückgang erregt eine neu sich fortpflanzende Luftwelle, die alle zusammen den Ton hervorbringen. Bei

den Blasinstrumenten sind es die elastischen Lippen oder schwingenden Zungen, Federn und Blättchen, die durch die komprimierte Luft beim Blasen in Bewegung gesetzt werden, in gewissen Fällen auch eigentümliche Zerreißungen des Luftstromes, die wir später zu betrachten Gelegenheit haben werden.

So abweichend von einander die auf diese verschiedenen Entstehungsursachen des Tones gegründeten musikalischen Instrumente auch sind, so liegen ihrem Bau doch bestimmte gemeinsame physikalische Prinzipien zu Grunde, über die uns das einfachste aller Saiteninstrumente, das Monochord, unterrichten kann.

Das Monochord soll seinem Namen nach aus einer einzigen Saite bestehen, besitzt indessen in der Regel Vorrichtungen zur Befestigung mehrerer; die Saite ist zur Verstärkung des Tones auf einem hohlen Kasten aus dünnem elastischen Holze, dem sogenannten Resonanzboden, über zwei Stege mit dem einen Ende an einem Wirbel befestigt, während das andere Ende über eine Rolle geführt und durch ein Gewicht gespannt wird. Durch Unterschieben eines kleinen beweglichen Holzsteges kann sie beliebig verkürzt werden; die Grundplatte hat eine Einteilung. In Abb. 262 ist ein solcher Apparat mit zwei Saiten dargestellt, wie er behufs der Untersuchung der Schwingungsgesetze passend verwendet werden kann. Wenn die Saite in ihrer Mitte mit dem Bogen gestrichen oder mit dem Finger gezupft wird, so gerät sie in Ausweichungen nach der Seite, sie macht als Ganzes sogenannte Transversalschwingungen. Der Punkt der größten Ausweichung liegt in der Mitte zwischen den beiden ruhenden Endpunkten (s. Abb. 263), und wir



262. Das Monochord.

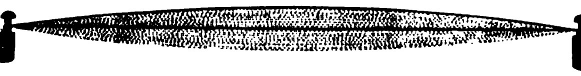
hören den Grundton oder den tiefsten Ton. Seine Schwingungsanzahl hängt ab von der Länge, von der Dicke, von der Dichtigkeit und von der Spannung der Saite. Über diese gegenseitige Abhängigkeit bestehen einfache Gesetze. Die Spannung mißt man am bequemsten, indem man das über die bewegliche Rolle geführte Ende der Saite mit Gewichten beschwert; dabei findet man, daß die Schwingungszahlen einer Saite den Quadratwurzeln aus den spannenden Gewichten proportional sind. Wenn eine Saite bei einer Belastung von 1 kg in der Sekunde 64 Schwingungen macht, so macht sie bei einer Spannung von 4 kg zweimal 64 oder 128 Schwingungen und dreimal 64 oder 192 Schwingungen bei einer Spannung von 9 kg. Wollte man demnach bei einer Saite nur die Veränderung der Spannung zur Hervorbringung tiefer wie hoher Töne benutzen, so würde für letztere die Spannung sehr beträchtlich gewählt werden müssen. Um eine gewisse Grenze der Spannung nicht zu überschreiten, ist man daher bei Musikinstrumenten gezwungen, die anderen Faktoren, welche auf die Höhe des Tones der Saite Einfluß haben, zu ändern: Dicke, Länge, Natur der Substanz. Die Schwingungszahlen von Saiten aus demselben Material verhalten sich bei gleicher Länge und gleicher Spannung umgekehrt wie ihre Dicken. Ist daher von zwei Saiten aus demselben Material, von derselben Länge und derselben Spannung die eine doppelt so dick als die zweite, so macht die dünnere in derselben Zeit doppelt so viele Schwingungen. Weiter hängt die Schwingungszahl ab von der Natur der Substanz, aus der die Saite besteht, und zwar von ihrer Dichtigkeit. Zwei gleich lange, gleich dicke und gleich gespannte Saiten, von denen die eine aus Kupfer, die andere aus Eisendraht besteht, werden verschieden hohe Töne liefern. Bei Saiten aus verschiedenem Material verhalten sich die Schwingungszahlen bei sonst gleichen Verhältnissen umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus ihren spezifischen Gewichten. Unter

sonst gleichen Umständen wird also eine Saite, deren Dichtigkeit nur ein Viertel von der einer anderen ist, die höhere Oktave des Tones der letzteren geben.

Die beiden letzten Sätze lassen sich auch in den einen zusammenfassen: Die Schwingungsanzahl einer Saite ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel ihres Gewichtes. Deswegen haben die dicken Saiten der Guitarren, Klaviere u. dgl., welche die tiefsten Töne erzeugen sollen, eine Umspinnung von Metalldraht, die ihr Gewicht vergrößert und die Schwingungen verlangsamt.

Diese Verhältnisse kommen zwar bei der Behandlung von musikalischen Instrumenten weniger in Betracht als bei deren Bau. Bei den Geigen, Violoncellis, Guitarren und anderen Musikinstrumenten werden den in bestimmten Spannungsverhältnissen befindlichen Saiten auch höhere Töne außer ihrem Grundton entlockt durch Verkürzung des schwingenden Teiles.

Eine Saite schwingt um so schneller, je kürzer sie gemacht wird. Wenn z. B. die Saite a b (s. Abb. 262), als Ganzes schwingend, 40 Schwingungen in der Sekunde ausführt, so wird sie deren 80 in derselben Zeit ausführen, wenn man durch Unterschieben des beweglichen Steges in der Mitte den schwingenden Teil um die Hälfte verkürzt; viermal soviel, wenn man diese Hälfte noch einmal halbiert u. s. f. Die Schwingungszahl einer Saite steht also in umgekehrtem Verhältnis zu ihrer Länge. Beim Violinspiel kann durch das Aufsetzen der Finger auf die verschiedenen Punkte der Saite eine ganze Reihe von Tönen mit allen möglichen dazwischen liegenden hervorgebracht werden, denn thatsächlich tritt durch Aufsetzen des Fingers näher dem Stege hin Verkürzung, durch Zurückgehen nach der Schnecke wieder Verlängerung der schwingenden Saite ein. Die leere Saite gibt den tiefsten Ton, den Grundton.



263. Schwingende Saite.

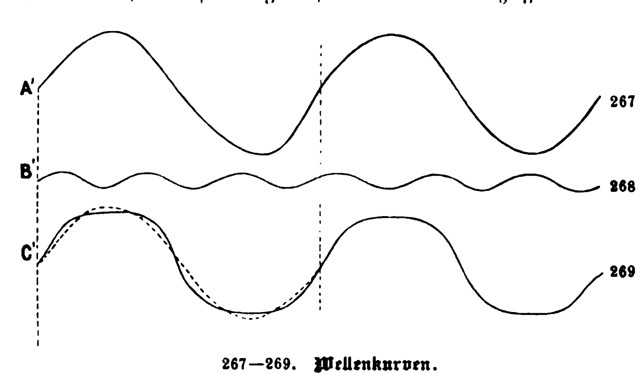
Dies sind die Gesetze einer schwingenden Saite, welche die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Spannung, vom Gewicht und von der Länge ausdrücken. Wie jede Farbe an und für sich zwar nicht häßlich ist, einen mehr oder weniger angenehmen Eindruck auf unser Auge aber erst durch Zusammenstellung mit anderen macht, so ist auch der Ton für sich allein nicht Gegenstand eines ästhetischen Genusses oder einer künstlerischen Verwendung; es erwächst vielmehr erst aus der Vereinigung und Verbindung mehrerer Töne die auf unser Gemüt so mannigfaltig und so wunderbar einwirkende künstlerisch bewußte Sprache der Tonkunst. Dieses Aufeinanderbeziehen der Töne, sei es ein Zusammenfassen gleichzeitig erklingender, sei es ein geistiges Begleiten und Nachfolgen der eben gehörten Töne und Tonfiguren, sucht und findet seine natürliche Begründung in einfachen mathematischen Verhältnissen, in welchen die Schwingungszahlen zu einander stehen.

„Es hat mich immer als ein wunderbares und besonders interessantes Geheimnis angezogen", sagt Helmholtz in seinem Vortrage über die physiologischen Ursachen der musikalischen Harmonie, „daß gerade in der Lehre von den Tönen, in den physikalischen und technischen Fundamenten der Musik, die unter allen Künsten in ihrer Wirkung auf das Gemüt als die stofflosesste, flüchtigste und zarteste Urheberin unberechenbarer und unbeschreibbarer Stimmungen erscheint, sich die Wissenschaft des reinsten und konsequentesten Denkens, die Mathematik, so fruchtbar erwies."

Musikalische Intervalle und die Tonleitern. Die Bewegungsform, in welcher der Ton in der Luft sich fortpflanzt, ist, wie wir bereits gesehen haben, eine Wellenbewegung, deren Wesen wir uns leicht durch die Wellenbewegung einer Wasseroberfläche veranschaulichen können. Wenn wir einen Stein in einen ruhigen Teich werfen, so sehen wir, wie vom Punkte der Erschütterung aus die Wellen dem Ufer in kreisförmigen immer größer werdenden Ringen zueilen. Wir können an dem Wellenzuge höchste und tiefste Stellen unterscheiden, Wellenberge und Wellenthäler. Ein Wellenberg und ein Wellenthal bilden eine Welle, und eine Wellenlänge rechnen wir von einem Wellenberge bis zum nächstfolgenden. Die Wasserteilchen, aus denen die Welle besteht, pflanzen sich nicht mit ihr fort, sie beschreiben vielmehr, jedes an seiner Stelle bleibend, in sich

geschlossene, senkrechte Kreisbahnen mit gleichförmiger Geschwindigkeit, während sich nur die Form der Oberfläche fortpflanzt. Denken wir uns nach dem ersten Steine, und zwar gerade in dem Momente, in dem die Wasserteilchen einen Umlauf vollendet haben, gleich noch einen zweiten genau auf dieselbe Stelle geschleudert, der aber Wellenringe von doppelter Geschwindigkeit erregen möge, so wird dadurch in dem regelmäßigen Verlauf der ersten längeren Wellen eine beträchtliche Störung nicht eintreten. Anfang und Ende derselben wird auch durch einen Anfang und ein Ende der kürzeren markiert sein, die Punkte der größten Ausweichung — Wellenberg und Wellenthal — werden etwas verschoben und höher resp. tiefer liegen, weil an diesen Stellen die in demselben Sinne stattfindenden Wirkungen sich summieren. Die Wellenkurven A und B (Abb. 264 und 265) mögen als vertikale Schnitte die beiden Wellenzüge veranschaulichen, von denen B in gleicher Zeit doppelt so viele Schwingungen ausführt als A. Der durch das gleichzeitige Ablaufen der beiden Wellenzüge resultierende Wellenzug wird dann durch die Wellenkurve C (Abb. 266) dargestellt; ein Vergleich mit der daneben gezeichneten punktierten Wellenkurve A zeigt, in welcher Weise dieselbe durch die Übereinanderlagerung der beiden Wellenzüge beeinflußt worden ist. Wenn aber der zweite Stein in derselben Zeit, in welcher der erste zwei Wellen bewirkte, deren drei erregt, so werden die Punkte der Übereinstimmung allemal erst nach zwei größeren Wellen wieder eintreten, innerhalb dieser Zwischenräume aber die beiden Wellenzüge sich auch beträchtlicher stören als vorher. Die bildliche Darstellung dieser beiden Wellenzüge würde durch die beiden Kurven A', B' (Abb. 267 und 268) gegeben sein, aus deren gleichzeitigem Zusammenwirken die Wellenkurve C' (Abb. 269) resultiert. Je komplizierter das Verhältnis der beiden Wellenzüge zu einander wird, um so verwirrter erscheint die Oberfläche des Wassers und demgemäß auch der Anschlag an das Ufer. Unser Ohr ist nun gewissermaßen das Ufer, an welches die Ringe der Tonwellen schlagen, und dieselben gegenseitigen Beeinflussungen, die zwei Wasserwellen auf einander ausüben, finden auch in dem Verlaufe der Luftwellen statt und werden von den Gehörnerven empfunden.

264—266. Wellenkurven.



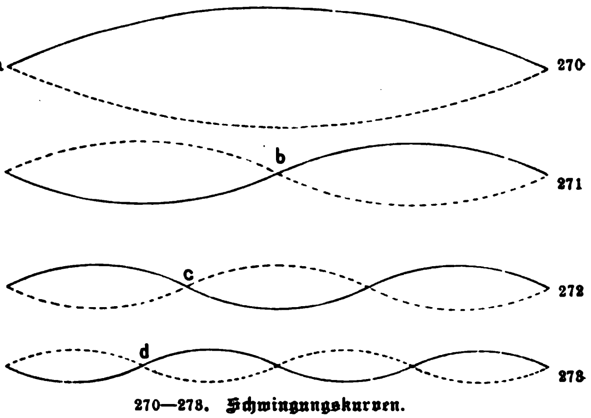
267—269. Wellenkurven.

Der französische Mathematiker Fourier hat den wichtigen Satz bewiesen, daß jede beliebige Wellenform von der Wellenlänge n aus einer Anzahl einfacher Wellen von der Wellenlänge n, $^1/_2$n, $^1/_3$n, $^1/_4$n ...... zusammengesetzt oder in diese Anzahl einfacher Wellen zerlegt werden kann; und der deutsche Physiker G. S. Ohm — der Entdecker des nach ihm benannten für die Elektrizitätslehre so wichtigen Ohmschen Gesetzes — hat durch aufmerksame Beobachtung gefunden, daß das menschliche Ohr thatsächlich eine solche Zerlegung einer Tonmasse auszuführen vermag, daß es die Wellenformen einer zusammengesetzten Tonmasse in eine Summe von einfachen Wellen aufzulösen im stande ist und den einer jeden einfachen Welle zugehörigen Ton einzeln empfindet.

Erregen wir z. B. eine Saite, so hören wir einen Klang, dessen Wellenform von der eines einfachen Tones, wie ihn etwa eine angeschlagene Stimmgabel liefert, stark abweicht. Die Saite schwingt nämlich nicht nur als Ganzes (Abb. 270), sondern auch in zwei, in drei, in vier, in fünf u. s. w. Abteilungen (Abb. 271—273), und man kann die diesen Schwingungen entsprechenden Töne einzeln hörbar machen, indem man die Saite erregt, während man sie mit dem Finger leise in ihrer Mitte oder in einem Drittel, einem Viertel, einem Fünftel u. s. w. ihrer Länge berührt. Unser Ohr vermag bei genauer Aufmerksamkeit aus dem Saitenklange alle diese einzelnen Töne heraus zu hören. Wir werden später noch von diesen sogenannten **Obertönen**, die die Klangfarbe eines Klanges bedingen, zu sprechen haben. Zunächst wollen wir uns aber mit der Bezeichnung der musikalischen Klänge und der musikalischen Intervalle beschäftigen.

Man hat die musikalischen Klänge nach ihren Schwingungszahlen geordnet, mit Buchstaben benannt und mit Noten bezeichnet. Den Ausgangspunkt bildet der sogenannte **Kammerton**, dessen Schwingungszahl nach **Scheibler** 440 ist und das eingestrichene a oder a_1 genannt wird. In der Notenschrift ist es der Ton . Von ihm lassen sich die Schwingungszahlen aller anderen Klänge mittels der bekannten Zahlenverhältnisse der musikalischen Intervalle ableiten.

Der Charakter eines Zusammenklanges zweier Töne ist uns um so angenehmer und wohlthuender, je einfacher das Verhältnis ist, in welchem ihre Schwingungszahlen zu einander stehen, oder was dasselbe ist, je gleichmäßiger und ruhiger der Verlauf der entsprechenden Wellenzüge ist; das Verhältnis zweier Töne von dem Schwingungsverhältnis 1 : 2 ist, wenn wir von dem Schwingungsverhältnis 1 : 1, dem sogenannten „Unisono“, absehen, das einfachste. Dies Verhältnis bezeichnet man in der Musiksprache mit dem Namen der **Oktave**. Der Abstand zweier Töne von einander bezüglich ihrer Schwingungszahlen heißt überhaupt ihr **Intervall**. Die Oktave empfindet unser Ohr als ein sehr harmonisches Intervall, die beiden Töne erklingen der Qualität nach gleich, und man bezieht alle möglichen Intervalle auf das Intervall 1 : 2. Man findet es auf dem Monochord, wenn man den beweglichen Steg so setzt, daß rechts $^2/_3$, links $^1/_3$ der Saite stehen bleibt; der längere Teil gibt den tieferen Ton, der kürzere die höhere Oktave. Setzt man den Steg so, daß rechts $^3/_5$, links $^2/_5$ der Saite liegen, so verhalten sich die Schwingungszahlen wie 2 : 3, und wir erhalten das nächsteinfache Intervall, die **Quinte**. Das Verhältnis der Schwingungszahlen 3 : 4 heißt die **Quarte**, 4 : 5 die **große Terz**, 5 : 6 die **kleine Terz**, 3 : 5 die **große Sexte**, 5 : 8 die **kleine Sexte**, das Verhältnis 8 : 15 die **Septime**.



270—273. Schwingungskurven.

Die musikalischen Bedürfnisse der Völker haben im Laufe der Zeiten immer kompliziertere Verhältnisse für ihre sich mehr und mehr verfeinernden Zwecke verwenden gelernt, so daß bis zu uns allmählich eine siebenstufige Tonleiter zwischen zwei Oktaven herausgebildet worden ist, deren Intervalle sich für einen Grundton von 24 Schwingungen in folgenden Verhältnissen bewegen:

1	2	3	4	5	6	7	8
24	27	30	32	36	40	45	48
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2

Die unten stehenden Bruchzahlen geben die Verhältnisse der Schwingungszahlen zum Grundton an. Dieser Tonleiter liegen die einfachen Intervalle, Grundton, Quinte, Quarte, große Terz, Sexte und Oktave zu Grunde. Die Quinte und die große Terz klingen bei den meisten Tönen als die ersten verschiedenen Intervalle in den harmonischen Obertönen sehr deutlich mit, sie bilden in selbständiger Vereinigung mit dem Grundton den einfachsten harmonischen Effekt, den Durdreiklang oder Durakkord. Die noch übrig bleibenden Intervalle zwischen Grundton und großer Terz, Sexte und Oktave erhält man, indem man über der Quinte, als dem dem Grundton verwandtesten Tone, einen neuen Dreiklang (Grundton, Terz und Quinte) aufbaut und die Quinte desselben eine Oktave tiefer legt.



274.

In Abb. 274 ist eine G-dur-Tonleiter in Notenschrift mit Benennung der einzelnen Töne gegeben.

Neben der großen Terz 4:5 zeichnet sich durch besondere Einfachheit des Schwingungsverhältnisses 5:6 die kleine Terz aus; sie ist deshalb auch zum Ausgang einer Tonleiter, der Molltonleiter, geworden.

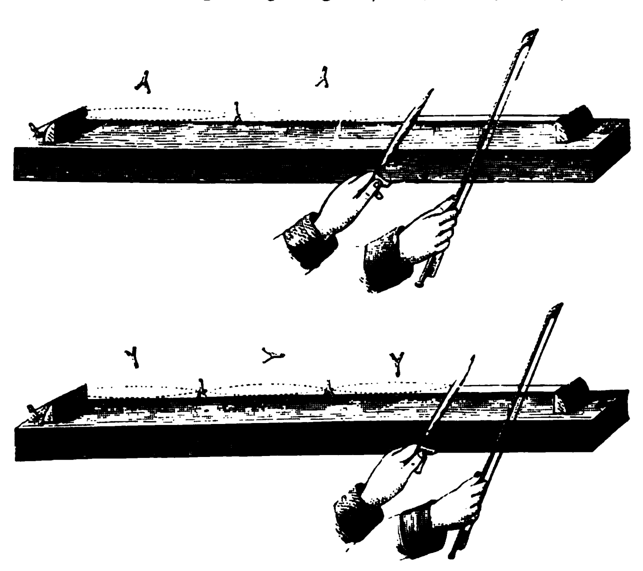

275. Hermann von Helmholtz.
Nach einer Photographie aus dem Jahre 1891.

In der Durtonleiter ist der Schritt von der Terz zur Quarte und von der Septime zur Oktave kleiner als bei den übrigen Intervallen; diese Intervalle heißen halbe Töne, weil man zwischen den übrigen ganzen Tönen je ein ähnliches Intervall noch einschalten kann. Das Fortschreiten in halben Tönen liefert die chromatische Tonleiter. Leider können wir auf die Besprechung dieses rein musikalischen Gebietes an dieser Stelle nicht näher eingehen. Nur das wollen wir noch bemerken, daß das gegenwärtig gebräuchliche Tonsystem mit seiner Dur- und Molltonleiter, so einfach und folgerichtig es sich auch aufbauen läßt, doch nicht als das einzig mögliche anzusehen ist. Unsere eigentümliche Bildungsweise hat dasselbe geschaffen. Wenn uns die Musik anderer, in abweichenden Anschauungen und Geschmacksrichtungen aufgewachsener Völker nicht gefällt, so sind wir zwar nicht gerade berechtigt, dieselbe als absolut unschön zu bezeichnen, indessen scheint doch das, was uns in den musikalischen Formbildungen befriedigt und erfreut, auf gewissen natürlichen Grundgesetzen zu beruhen, die mit unserer ganzen Organisation zusammenhängen. Sehr treffend sagt der bekannte Musikschriftsteller Hanslick: „Alle musikalischen Elemente stehen unter sich in geheimen, auf Naturgesetze gegründeten Verbindungen und Wahlverwandtschaften. Diese den Rhythmus, die Melodie und die Harmonie unsichtbar beherrschenden Wahlverwandtschaften verlangen in der menschlichen Musik ihre Befolgung und stempeln jede

ihnen widersprechende Verbindung zu Willkür und Häßlichkeit. Sie leben, wenngleich nicht in der Form wissenschaftlichen Bewußtseins, instinktiv in jedem gebildeten Ohr, das demnach das Organische, Vernunftgemäße einer Tongruppe, oder das Widersinnige, Unnatürliche derselben durch bloße Anschauung empfindet, ohne daß ein logischer Begriff den Maßstab oder das tertium comparationis hierzu abgäbe. In dieser negativen inneren Vernünftigkeit, die dem Tonsystem durch Naturgesetze innewohnt, wurzelt dessen weitere Fähigkeit zur Aufnahme positiven Schönheitsgehaltes."

Die physiologische Grundlage für die Theorie der Musik hat eine klassische Darstellung durch Helmholtz in dessen „Lehre von den Tonempfindungen" erfahren, in welcher nicht nur die Grenzgebiete der physikalischen und physiologischen Akustik, sondern auch der Musikwissenschaft und der Ästhetik ihre Vereinigung finden, und deren Ergebnisse auch den praktischen Disziplinen des Instrumentenbaues und der Behandlung der musikalischen Instrumente in ausgezeichneter Weise zu statten kommen.

Helmholtz' Theorie der Klangfarbe. Ein Ton von bestimmter Höhe klingt uns verschieden, je nachdem wir ihn von einer Sängerin gesungen hören, oder je nachdem er einer Violine oder einer Flöte entlockt wird. Was ist das Charakteristische, das uns den Ton als von der menschlichen Stimme, von der Violine, von der Flöte herrührend sicher erkennen läßt? Es ist die Thatsache, daß der Ton der menschlichen Stimme, der Saite einer Violine, der Flöte von einer gewissen Kombination von Obertönen begleitet ist, deren Anzahl und Stärke für die verschiedenen musikalischen Instrumente verschieden ist. Diese Obertöne bedingen die Klangfarbe des Tones, und ihr entspricht eine bestimmte Schwingungs- oder Wellenform. Die Weichheit einfacher Töne, wie sie z. B. eine angeschlagene Stimmgabel liefert, beruht auf dem Fehlen der Obertöne, ihre Schwingungsformen sind einfache, gleichmäßig gerundete Sinuskurven; der scharfe Klang der Violinsaite rührt davon her, daß in ihm viele hohe Obertöne enthalten sind, und daß die entsprechende Schwingungsform eine komplizierte, mehr oder weniger abgerissene ist.


276 u. 277. Entstehung der Schwingungsknoten bei gespannten Saiten.

In dieser Beziehung geben uns die sogenannten Flageoletttöne der Saiteninstrumente Gelegenheit zu interessanten Beobachtungen. Sie sind bekanntlich viel höher als derjenige Ton, welcher der in ihrer ganzen freien Länge schwingenden Saite zukommen würde, und man erhält sie, wenn man die Saite an einem Punkte, der einen ohne Rest in der ganzen Saitenlänge aufgehenden Abschnitt, also z. B. $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ u. s. f., bezeichnet, leise mit dem Finger oder mit einer Feder berührt und sie durch Anstreichen mit dem Bogen zum Tönen bringt. Wenn die Berührung leise genug ist, so daß dadurch zwar der betreffende Punkt in Ruhe gehalten wird, die Schwingungen sich aber der übrigen Saite noch mitteilen können, so vibriert diese allerdings in ihrer ganzen Länge, aber nicht als Ganzes, sondern in einzelnen Abschnitten, die unter sich gleich und durch die Entfernung des festgehaltenen Punktes von dem nächsten Ende bestimmt sind. Die Endpunkte solcher schwingenden Saitenteilstücke bleiben in Ruhe und werden Schwingungsknoten genannt. Berührt man also die Saite des Monochords (Abb. 276) leise mit dem Finger oder mit einer

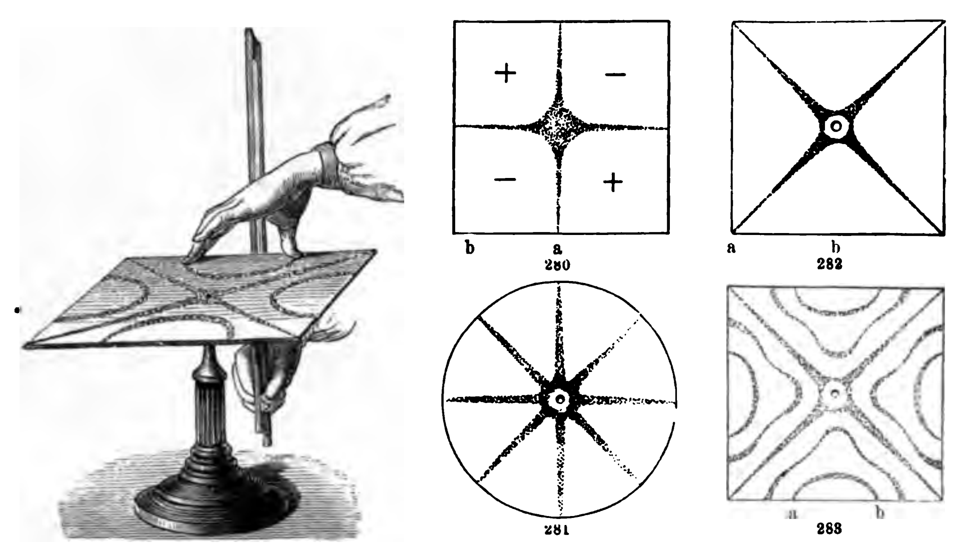
Feder in einem Drittel ihrer Länge und setzt sie dann in Schwingungen, indem man den kürzeren Teil mit dem Bogen anstreicht, so schwingt nicht nur dieser Teil, sondern auch der größere, welcher sich in zwei Schwingungsbäuche teilt, die durch einen Knotenpunkt von einander getrennt sind. Wir erhalten also außer dem Berührungspunkt, der gleichfalls einen Knotenpunkt bildet und in Ruhe bleibt, einen zweiten Knotenpunkt. Berührt man die Saite in einem Viertel ihrer Länge und führt den Bogen über den kürzeren Teil, so gerät nicht nur dieser in Schwingungen, sondern auch der längere Teil der Saite teilt sich in drei Abteilungen, in drei Bäuche, die durch zwei Schwingungsknoten von einander getrennt sind. Man kann dies leicht sichtbar machen, indem man auf die Schwingungsknoten und auf die Bäuche kleine Papierreiterchen aufsetzt. Wird die Saite in Schwingungen versetzt, so bleiben die Reiterchen auf den Knotenpunkten ruhig sitzen, während sie von den dazwischen liegenden Stellen der schwingenden Saitenteile abgeworfen werden (Abb. 276 u. 277). Indem wir die Saite in einem Fünftel, einem Sechstel, einem Siebentel u. s. f. ihrer Länge berühren und anstreichen, erhalten wir Schwingungsformen derselben mit fünf, sechs, sieben u. s. f. Bäuchen, die durch vier, fünf, sechs u. s. f. Knotenpunkte von einander getrennt sind. So sehen wir, daß die Saite entweder als Ganzes schwingen kann oder sich in eine Anzahl gleicher Abteilungen teilen läßt, deren jede unabhängig von den anderen ihre Schwingungen ausführt. In der Musik macht man von dieser Selbstteilung der Saiten vielfach Anwendung.



278. Ernst Florens Friedrich Chladni.

Schwingungsknoten entstehen aber nicht nur bei schwingenden Saiten, sondern auch bei schwingenden Stäben, die an einem Ende befestigt sind, wie dies bei der Stabharmonika der Fall ist, ferner bei Schwingungen von an beiden Enden freien Stäben, wie bei der Glasharmonika, dem Glockenspiel und endlich bei der Stimmgabel, die man ja als einen uförmig gebogenen Stab betrachten kann. Chladni, den man wohl als den Vater der neueren Akustik bezeichnen kann, hat die verschiedenen Schwingungsformen und Tonverhältnisse nicht nur solcher schwingenden Stäbe, sondern auch schwingender Membranen und Platten experimentell untersucht. Er fand zuerst, daß Glas- oder Metallplatten verschiedene Töne liefern, wenn sie an verschiedenen Stellen festgehalten und angeschlagen oder angestrichen werden. Er hat auch zuerst die sinnreiche Methode angegeben, die Tonschwingungen einer Platte und deren Knotenlinien dadurch sichtbar zu machen, daß er auf die Platte feinen Sand streute, der von den schwingenden Teilen der Platte fortgeschleudert wird, und so ihre Knotenlinien markiert. Abb. 279 veranschaulicht die Art der Hervorbringung der Chladnischen Klangfiguren. Eine quadratische Messingplatte ist in ihrer Mitte auf einem soliden Stative befestigt. Streut man auf sie feinen Sand und versetzt sie, während man zwei Punkte einer ihrer Seiten durch Berührung mit zwei Fingern dämpft, durch Anstreichen mittels eines Violinbogens in Vibration, so geraten an allen schwingenden Punkten der Platte die Sandkörnchen in eine lebhaft

hüpfende Bewegung, infolge deren sie sich bald in regelmäßige Figuren auf denjenigen Teilen anordnen, die von der schwingenden Bewegung nicht ergriffen sind. Die Schwingungsform und also auch die Gestalt der Klangfigur ändert sich bei verschiedenartigem Dämpfen und Anstreichen. Abb. 280 erhält man von einer quadratischen in ihrer Mitte befestigten Platte, wenn man den Punkt a dämpft und sie nahe an einer ihrer Ecken, etwa bei b, anstreicht. Durch die + und —Zeichen soll angedeutet werden, daß die mit + bezeichneten Teile sich während der Schwingungen in entgegengesetzter Richtung bewegen, wie die mit — bezeichneten Teile, daß also die letzteren Teile nach unten schwingen, während die ersteren nach oben schwingen und umgekehrt. Die Knotenlinien bilden die Grenzen dieser entgegengesetzten Bewegungen. Abb. 282 erhält man, wenn man die Platte an einer Ecke bei a berührt und in der Mitte bei b anstreicht. Die komplizierte Abb. 283 erhält man, wenn man eine Seite der Platte bei den Punkten a und b dämpft und sie in der Mitte der gegenüberliegenden Seite anstreicht. Chladni hat auch die Klangfiguren anderer symmetrisch geformter Scheiben untersucht. Eine in ihrer Mitte eingespannte kreisförmige Scheibe, die an einem Punkte ihrer Peripherie gedämpft und in einem



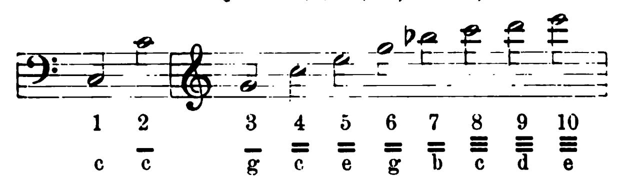
279. Hervorbringen der Chladnischen Klangfiguren. 280—283. Chladnische Klangfiguren.

45 Grad von ihm entfernten Punkte angestrichen wird, schwingt in vier symmetrischen Abteilungen, die durch zwei Knotenlinien (zwei aufeinander senkrecht stehende Durchmesser) von einander getrennt sind. Diese Schwingungsform entspricht dem tiefsten Ton der Platte. Wird sie in einem Punkte angestrichen, der 30 Grad von dem berührten entfernt ist, so schwingt sie in sechs symmetrischen, durch radiale Knotenlinien von einander getrennten Abteilungen. Abb. 281 stellt die Klangfigur dar, die eine kreisförmige in ihrem Mittelpunkte eingespannte Platte liefert, wenn ein Punkt ihrer Peripherie berührt, und sie in einem Punkte angestrichen wird, der etwa 22 Grad von dem berührten Punkte entfernt ist. Die Platte teilt sich in acht schwingende Teile, die von einander durch radiale Knotenlinien getrennt sind.

Was wir nun bei der Anordnung unseres Versuches (Abb. 276 u. 277) absichtlich hervorriefen, das tritt bei einer schwingenden Saite von selbst auf. Die Saite kann nicht als Ganzes schwingen, ohne zu gleicher Zeit in einer kleineren oder größeren Anzahl von Abteilungen zu schwingen. Die durch die letzteren erzeugten höheren Töne nennt man die **harmonischen Obertöne** oder **Nebentöne** des Grundtons. Ein einfacher, unvermischter Ton kommt fast bei keinem der musikalischen Instrumente vor. Ihre Töne sind eine Mischung des Grundtons mit höheren Tönen, und auf dem Grade und der Art dieser Vermischung beruht das Charakteristische für den Ton eines bestimmten

Instruments, seine Klangfarbe, sein Timbre. Wollte ein Geigenspieler den Grundton oder einen anderen Ton einer Saite rein und frei von Nebentönen zu Gehör bringen, er wird dies nicht vermögen. So scharf und sicher er auch greifen, so kunstgerecht er auch den Bogen handhaben mag, immer klingen andere Töne mehr oder weniger stark mit, indem sich die Saite von selbst in ähnlicher Weise teilt wie bei den Flageoletttönen, oder indem die übrigen Bestandteile des Instruments mit in Schwingungen geraten, wohl auch dadurch, daß infolge der ungleichen Erregung der Saite über die ganze Länge derselben kleine Wellenkräuselungen gehen. Alle diese Töne setzen sich zu einem Gesamtklange zusammen, der für die Violinsaite charakteristisch ist und sich durch die Anzahl und die Stärke seiner Obertöne von einem Tone gleicher Höhe einer Klarinette oder einer Flöte oder eines Klaviers sicher unterscheidet.

Die Obertöne eines in Schwingungen versetzten elastischen Körpers stehen nun zu seinem Grundtone in einem einfachen gesetzmäßigen Zusammenhange; ihre Schwingungsanzahl ist zwei-, drei-, vier-, fünf- u. s. w. mal so groß als diejenige des Grundtons. Nennen wir den letzteren c, so ist ihre Reihe in Notenschrift, wie folgt, gegeben:



Die Stärke der Obertöne im Klange einer angeschlagenen Saite hängt ab von der Natur des Materials, aus welchem sie besteht, von ihrer Dicke und Steifigkeit, ferner von der Art des Anschlags und hauptsächlich endlich von der Stelle des Anschlags. Darmsaiten liefern, da sie leichter sind, höhere Obertöne als Metallsaiten von gleicher Dicke und Festigkeit; da aber die Darmsaiten weniger elastisch sind, so werden bei ihnen die hohen Obertöne schneller gedämpft, und deshalb ist der Klang gerissener Darmsaiten, z. B. bei der Guitarre und der Harfe, nicht so klimpernd, wie der von Metallsaiten, z. B. bei der Zither. Dickere Metallsaiten liefern ferner nicht so hohe Obertöne, wie dünnere.

Was die Art des Anschlags betrifft, so kann die Saite entweder gerissen werden mit dem Finger oder einem Stifte, wie bei der Harfe, Guitarre und Zither, oder sie kann angeschlagen werden mit einem Hammer, wie beim Klavier. Beim Anreißen mit dem Finger ist die Diskontinuität der Bewegung der Saite nicht so scharf und eckig, wie beim Anreißen mit einem Stifte, deshalb hört man im letzteren Falle einen schärferen Klang mit höheren Obertönen, als im ersten. Beim Anschlagen der Saite mit einem weichen Hammer wird die Diskontinuität der Bewegung und dementsprechend die Zahl und Stärke der hohen Obertöne sehr vermindert, wodurch der Klang weicher und wohlklingender wird.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Klangfarbe hat endlich die Anschlagstelle. Reißt man die Saite des Monochords in ihrer Mitte an, so hört man einen hohlen, dumpfen Klang derselben; reißt man sie in einem Drittel ihrer Länge, so ändert sich der Klang, er wird voller; reißt man sie in einem Viertel ihrer Länge, so ändert sich wieder die Klangfarbe; der Ton wird um so reicher und voller, je weiter die Anschlagstelle von der Mitte entfernt liegt.

Thomas Young, der berühmte englische Physiker, der Begründer der Wellentheorie des Lichts, hat zuerst die Ursache für die Verschiedenheit der Klangfarben einer und derselben schwingenden Saite kennen gelehrt. Er hat bewiesen, daß, wenn man eine Saite anschlägt oder zupft oder, wie Helmholtz hinzufügt, anstreicht in einem solchen Punkte ihrer Länge, welcher Knotenpunkt eines ihrer Flageoletttöne ist, daß dann alle diejenigen einfachen Schwingungsformen der Saite, welche in dem Anschlagspunkte einen Knotenpunkt besitzen, in der resultierenden Schwingungsform der Saite nicht enthalten sind, daß also auch in dem Gesamtklange alle höheren Obertöne fehlen, für welche der Anschlagspunkt ein Knotenpunkt ist. Reißen wir daher die Saite in ihrer Mitte an, so fehlen in dem Gesamtklange der zweite, der vierte, der sechste . . . ., kurz alle geradzahligen Obertöne, weil sie alle in der Mitte der Saite einen Knotenpunkt haben.

Reißen wir die Saite in einem Drittel ihrer Länge an, so fehlen in dem Gesamtklange der dritte, der sechste, der neunte .... Oberton; zupfen wir sie in einem Viertel ihrer Länge, so fehlen der vierte, der achte, der zwölfte .... Oberton u. s. w. Dies läßt sich leicht experimentell nachweisen. Berühren wir nämlich eine schwingende Saite leise mit dem Finger oder mit einer Feder, so werden alle diejenigen einfachen Schwingungsformen oder die ihnen entsprechenden Obertöne gedämpft, welche in dem berührten Punkte der Saite keinen Schwingungsknoten haben, diejenigen Obertöne aber, für welche der berührte Punkt ein Knotenpunkt ist, bleiben bestehen und werden nicht gedämpft. Zupfen wir also die Saite in der Mitte und berühren sie unmittelbar darauf an derselben Stelle, so wird der Grundton vernichtet, und man hört auch keine höhere Oktave desselben; die Saite schweigt, als Beweis dafür, daß durch das Zupfen in der Mitte die Obertöne, deren Schwingungszahlen das Zwei-, Vier-, Sechsfache u. s. w. der Schwingungszahl des Grundtons sind, d. h. alle geradzahligen Obertöne, die in der Mitte einen Knotenpunkt besitzen, verschwunden sind. Zupfen wir die Saite in $^1/_4$ ihrer Länge und berühren unmittelbar darauf die Mitte, so wird der Grundton vernichtet, aber seine Oktave erklingt deutlich. Da die Saite nicht in der Mitte gezupft wurde, so bildet sich dort ein Knotenpunkt, und die beiden Hälften der Saite schwingen fort, nachdem ihre Schwingung als Ganzes vernichtet ist. Zupft man die Saite in $^1/_3$ ihrer Länge und berührt sie unmittelbar darauf in $^1/_3$ oder $^2/_3$, so schweigt die Saite, als Beweis dafür, daß der dritte Partialton fehlt; wäre er vorhanden, so würde er durch das Berühren nicht verschwinden, da in $^1/_3$ und in $^2/_3$ der Saitenlänge seine Knotenpunkte liegen. Zupfen wir dagegen die Saite an einem anderen Punkte, z. B. in $^1/_5$ der Länge, und berühren unmittelbar danach bei $^1/_3$, so hören wir nach dem Aufhören des Grundtons den dritten Partialton deutlich erklingen. Da die Saite bei $^1/_3$ nicht gezupft wurde, so bildet sich dort ein Knoten, und die Saite schwingt in drei Abteilungen weiter, nachdem sie als Ganzes zu schwingen aufgehört hat. So läßt sich die Richtigkeit des Thomas Youngschen Gesetzes experimentell bestätigen und ein Saitenton in Bezug auf die Obertöne, welche er enthält, analysieren.



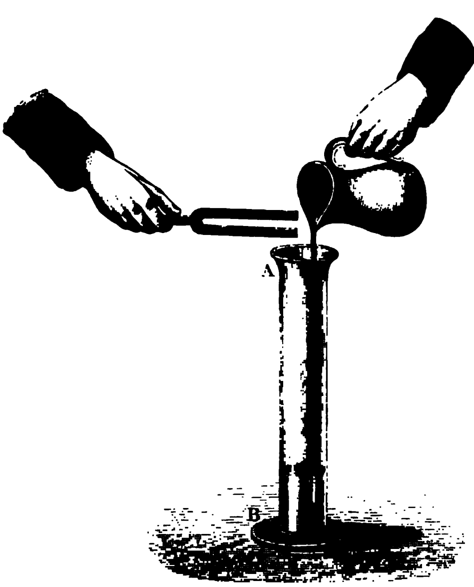
284. Thomas Young.

Es erscheint auffällig, daß ein musikalisch geübtes Ohr aus dem Gesamtklange einer Saite diese einfachen Töne nicht sofort heraus zu hören vermag, obschon sie doch in demselben fortdauernd vorhanden sind! Helmholtz hat indessen gezeigt, daß dies nur auf einem Mangel an Übung und Aufmerksamkeit beruht, und daß man sie bei angestrengter Aufmerksamkeit auch in dem Gesamtklange der Saite zu unterscheiden im stande ist, wenn man sich vorerst auf die beschriebene Weise die einfachen Töne einzeln hörbar gemacht hat.

Der Einfluß, welchen die Anschlagstelle auf die Klangfarbe des Tones ausübt, ist nicht nur für die Theorie der Klangfarbe von hervorragendem Interesse, sondern er

findet auch eine wichtige praktische Verwertung beim Bau der musikalischen Instrumente. Bei den mittleren Saiten des Pianofortes liegt die Anschlagstelle des Hammers $1/7$—$1/9$ der Länge der Saite von ihrem Ende entfernt. Wir müssen mit Helmholtz annehmen, daß die Instrumentenmacher weniger geleitet durch die Theorie, als durch das Bedürfnis des künstlerisch gebildeten Ohres und die technische Erfahrung zweier Jahrhunderte diese Anschlagstelle gewählt haben, weil sie den musikalisch schönsten Klang liefert, und zwar deshalb, weil der siebente und der neunte Partialton des Klanges ausfallen oder mindestens sehr schwach werden. Die sechs ersten Partialtöne bilden nur Oktaven, Quinten und große Terzen des Grundtons, während der siebente eine kleine Septime und der neunte die große Sekunde des Grundtons bilden, die in den Durdreiklang nicht passen; sie würden als Dissonanzen wirken und werden deshalb durch jene Wahl der Anschlagstelle beseitigt.

Resonanz. Schlagen wir eine gewöhnliche Stimmgabel an, so hören wir ihren Ton deutlich nur, wenn wir sie nahe ans Ohr halten. Die Quantität der Bewegung, welche die Stimmgabel der Luft mitteilt, ist zu gering, um noch in größerer Entfernung sicher wahrgenommen zu werden. Halten wir die schwingende Stimmgabel aber über ein hohes, oben offenes Standglas (Abb. 285), in welches wir möglichst geräuschlos Wasser eingießen, wodurch die unter der Gabel befindliche Luftsäule verkürzt wird, so nimmt der Ton an Stärke bis zu einem Maximum zu, wenn die Wassersäule eine gewisse Höhe erreicht hat, um alsdann wieder schwächer zu werden, wenn wir über jene Stelle noch weiter Wasser hinzugießen. Wiederholt man den Versuch mit Stimmgabeln, deren Schwingungsanzahl größer oder kleiner ist, so findet man, daß das Maximum der Tonverstärkung bei einer längeren, resp. kürzeren Luftsäule stattfindet. Man nennt diese Art der Tonverstärkung Resonanz, und hat gefunden, daß das Maximum der Resonanz bei einer Luftsäule stattfindet, deren Länge gleich dem Viertel der Wellenlänge des Stimmgabeltons ist. Entsprechend diesem Gesetze wird die Länge der aus dünnem, elastischem Holze hergestellten Resonanzkästen, auf welche man die Stimmgabeln befestigt, gewählt.



285. Resonanz einer Luftsäule.

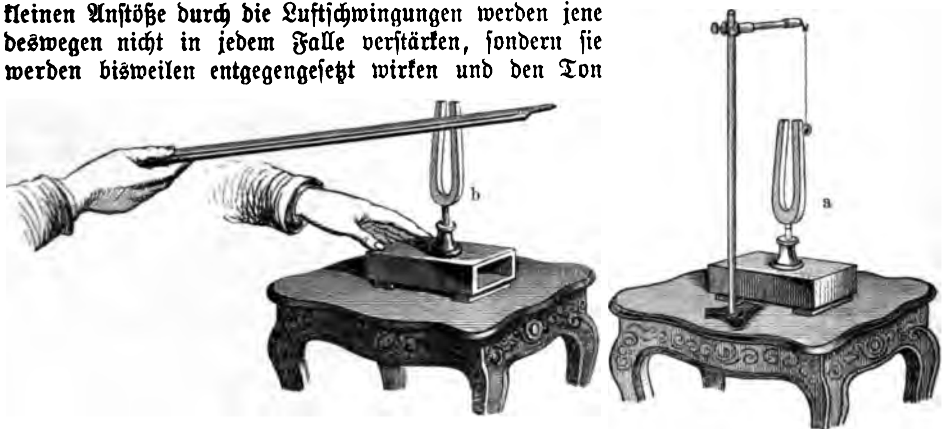
Die Erscheinung der Resonanz läßt sich sehr schön mittels der Savartschen Glocke demonstrieren (Abb. 286). Sie besteht aus einer auf schwerem Fuße ruhenden Metallglocke G und einer ausziehbaren und verstellbaren, an ihrem einen Ende verschlossenen Metallröhre R. Streicht man die Glocke mittels eines Violinbogens an, so erhält man einen reinen hellen Ton, welcher an Stärke anschwillt, wenn man die Röhre der Glocke nähert, und dessen Stärke das Maximum erreicht, wenn man der Röhre die dem Eigenton der Glocke entsprechende Länge gibt, d. h. wenn die Länge der Röhre ein Viertel der Wellenlänge des Tones der Glocke ist. Wäre die Resonanzröhre beiderseitig offen, so müßte ihre Länge doppelt so groß sein, um durch sie die stärkste Resonanz des Tones zu erzielen.

Viele interessante Tonverstärkungen, welche wir in der Natur wahrnehmen, sind eine Folge der Resonanz, z. B. das Sausen, welches wir hören, wenn wir eine hohle Muschel dicht an unser Ohr halten; das betäubende, donnerähnliche Geräusch des Reußfalles bei der Teufelsbrücke auf der Gotthardstraße wird durch Resonanz der engen und tiefen, von mächtigen Felsen eingeschlossenen Schlucht verursacht.

Das **Mitschwingen** oder **Mittönen** gleichgestimmter Instrumente ist auch eine Resonanzerscheinung. Wird von zwei gleichgestimmten Saiten die eine zum Tönen gebracht, so tönt alsbald auch die andere. Hebt man durch Niederdrücken der Taste den Dämpfer von einer Saite des Klaviers ab und singt bei geöffnetem Deckel den entsprechenden Ton in das Klavier hinein, so tönt deutlich derselbe Ton wieder heraus. Anfänglich ertönt nur ein etwas verworrenes Geräusch durch das Erklingen einer großen Zahl durch die Luftschwingungen in Erschütterung versetzter Saiten. In diesem Geräusch tritt aber der mit dem gesungenen gleichartige Ton sehr stark hervor und klingt noch nach, wenn die anderen Saiten schon ganz verstummt sind, weil auf jede Saitenschwingung eine in gleichem Sinne wirkende Luftschwingung des gesungenen Tones trifft und durch diese wiederholten kleinen Impulse die ersteren immer stärker erregt werden. Alle anderen Saiten haben Schwingungen von verschiedenen Geschwindigkeiten; die kleinen Anstöße durch die Luftschwingungen werden jene deswegen nicht in jedem Falle verstärken, sondern sie werden bisweilen entgegengesetzt wirken und den Ton aufheben. Eine schwere Metallglocke kann leicht dadurch zum Tönen gebracht werden, daß man ihren Eigenton in dieselbe hineinsingt oder hineinpfeift.



286. Versuch mit der Savartschen Glocke.

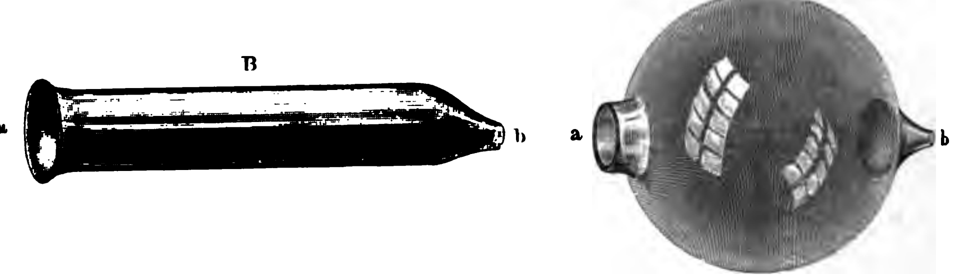


287 u. 288. Resonanz zweier Stimmgabeln.

Stellt man zwei genau auf denselben Ton abgestimmte, auf Resonanzböden befestigte Stimmgabeln mehrere Meter von einander entfernt so auf, daß die Resonanzkästen ihre offenen Enden einander zukehren, und streicht alsdann die eine der beiden Stimmgabeln an, so hört man alsbald auch die zweite Stimmgabel deutlich tönen, nachdem man die erste zum Schweigen gebracht hat; bringt man alsdann die zweite Stimmgabel zum Schweigen, so hört man wieder die erste Stimmgabel tönen u. s. f. Man kann diese Erscheinung bequem auf weite Entfernung hörbar und sichtbar machen, indem man eine leichte hohle Glaskugel an einem feinen Kokonfaden so aufhängt, daß sie das obere Ende der einen Zinke der Stimmgabel a (Abb. 287 und 288) eben berührt. Wird nun Stimmgabel b angestrichen, so kommt alsbald auch Stimmgabel a zum Mittönen und bewirkt durch die Schwingungen ihrer Zinken ein periodisches Ab- und Zurückprallen der leichten Glaskugel, welches man sehr weit sehen und hören kann.

Helmholtz hat zur Analyse der Klangfarbe der Töne das Prinzip der Resonanz benutzt und zu diesem Zwecke **Resonatoren** konstruiert, welche aus gläsernen oder metallenen Hohlkugeln oder Hohlcylindern mit zwei Öffnungen bestehen (Abb. 289 u. 290). Durch die eine größere Öffnung a mit scharf abgeschnittenen Rändern dringen die Tonwellen in den Resonator, die kleinere trichterförmige Öffnung b dient dazu, um mittels weichen Siegellacks oder Wachses in den Gehörgang des Ohrs hineingedrückt zu werden. Den verschiedenen Tönen entsprechen nun Resonatoren von verschieden großer Kapazität, den tiefen Tönen solche von großem, den hohen solche von kleinem Volumen. Jeder Resonator verstärkt also nur einen einzigen, ganz bestimmten Ton und bietet somit ein außerordentlich empfindliches Mittel, um entscheiden zu können, ob in einem zusammengesetzten Klange dieser Ton enthalten ist oder nicht.

Mit Hilfe der Resonatoren hat Helmholtz die zuerst von **Wheatstone** aufgestellte **Theorie der Vokalklänge** der menschlichen Stimme zum Gegenstand einer erschöpfenden Untersuchung gemacht. Er hat gezeigt, daß die Bildung der **Vokale**, der eigentümliche Charakterunterschied, welchen z. B. der Vokal a gegenüber den Vokalen o, u, e, i und



289 u. 290. Resonatoren nach Helmholtz.

diese wieder unter einander haben, an das Vorhandensein bestimmter Obertöne geknüpft ist. Wenn ein Sänger auf eine bestimmte Note den Vokal a singt, so läßt er durch eine ganz bestimmte Stellung und Formgebung seiner Mundhöhle andere Obertöne neben jenem Hauptttone mit ansprechen, als wenn er auf dieselbe Note den Vokal o oder einen der übrigen Vokale intoniert, und diese Obertöne sind es, welche auch beim gewöhnlichen Sprechen den Klang eben zu einem a oder zu einem o, u, e oder i machen. Helmholtz hat auch zur Probe für die Richtigkeit der Theorie die Vokale durch Zusammenmischen der entsprechenden Tonbestandteile künstlich hervorgebracht. Zur Hervorbringung des Vokals U muß die Mundhöhle möglichst weit und ihre Öffnung durch Aneinanderschließen der Lippen möglichst enge gemacht werden. Diese Mundstellung liefert die tiefste Resonanz entsprechend dem ungestrichenen f. Beim Vokal O ist der Mund etwas weiter geöffnet; ihm entsprechen diejenigen Obertöne, die dem eingestrichenen b nahe liegen. Schlägt man eine auf b abgestimmte Stimmgabel an und bringt sie vor die Mundöffnung, während man leise O spricht oder auch nur der Mundhöhle eine solche Stellung gibt, als wollte man O sagen, so hört man den Ton der Stimmgabel laut erklingen. Beim Vokal A erhält die Mundhöhle eine von hinten nach vorn sich erweiternde Form; ihm entsprechen die dem zweigestrichenen b nahe liegenden Obertöne. Bei den Vokalen Ä, E, J ist der hintere Teil der Mundhöhle weit, während die Lippen zurückgezogen werden, und der vordere Teil der Zunge gegen den harten Gaumen sich hebt und einen engen Kanal bildet. Dieser liefert einen höheren, der hintere Teil der Mundhöhle einen zweiten, tieferen Resonanzton. Nebenstehend sind die den einzelnen Vokalen entsprechenden Obertöne in Notenschrift zusammengestellt.



Kombinationstöne. Während die Obertöne als Begleiter des Grundtones eines und desselben Klanges auftreten, ihre Entstehungsursache also in dem einen tonerzeugenden Körper allein zu suchen ist, gibt es eine andere Gattung von musikalischen Klängen, die zu ihrem Entstehen des Zusammentreffens zweier verschiedener Schallwellenzüge, also einer Verbindung zweier verschiedener musikalischen Töne bedürfen. Es sind dies die sogenannten Kombinationstöne, die von dem deutschen Organisten Sorge im Jahre 1740 entdeckt, aber erst später (1754) durch den berühmten italienischen Geiger Tartini allgemeiner bekannt wurden, nach welchem sie auch Tartinische Töne genannt werden.

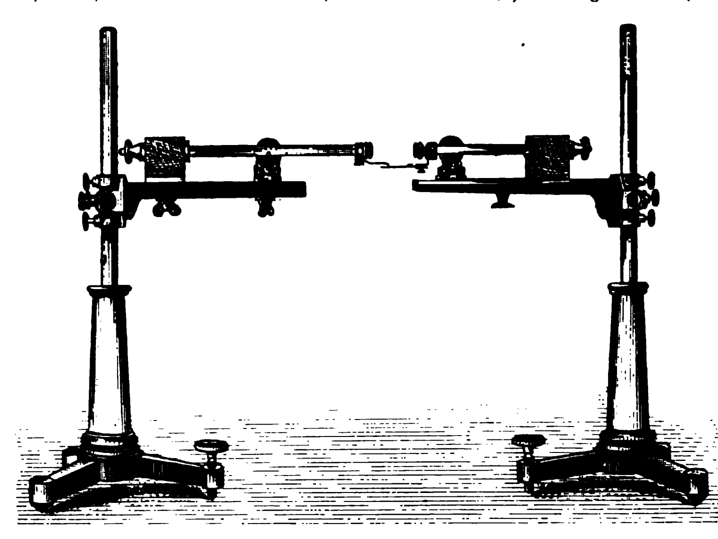
Man hört diese Kombinationstöne, indem man zwei musikalische Töne von verschiedener Höhe, die etwa ein rein gestimmtes Intervall innerhalb einer Oktave bilden, möglichst kräftig und gleichmäßig anhaltend hervorbringt. Man unterscheidet nach Helmholtz zwei Arten von Kombinationstönen, nämlich erstens die von Sorge und Tartini entdeckten, die dadurch charakterisiert sind, daß ihre Schwingungszahlen gleich den Differenzen zwischen den Schwingungszahlen der beiden ursprünglichen Töne sind, und deshalb von Helmholtz auch Differenztöne genannt werden, und zweitens die von Helmholtz entdeckten Summationstöne, deren Schwingungszahlen gleich der Summe der Schwingungszahlen der beiden ursprünglichen Töne sind. Die ersteren sind im allgemeinen bedeutend intensiver als die zweiten.

Gesetzt, ein Grundton und seine große Terz, deren Schwingungszahlen sich wie 4 : 5 verhalten, seien gleichzeitig angegeben worden, so fällt allemal die vierte Verdichtungswelle des ersteren mit der fünften des zweiten Tones zusammen, und in demselben Augenblick findet ein Anschwellen statt. Wiederholt sich dies in der Sekunde genügend oft, so faßt das Ohr die Gesamtheit dieser Verstärkungen, zwischen denen dann ebensoviele Abschwächungen liegen, als einen neuen tieferen Ton auf, der nun zwei Oktaven tiefer ist als der Grundton. So läßt sich nach Thomas Young wohl die Entstehung der Differenztöne erklären, nicht aber die der Summationstöne. Sie lassen sich durch die mathematische Theorie erklären, die nachweist, daß, wenn die Schwingungen der Luft, die durch die beiden primären Töne bewegt wird, nicht mehr als unendlich klein, sondern als beträchtlich anzusehen sind, daß dann noch sekundäre Schwingungen der Luft entstehen, deren Tonhöhe den Kombinationstönen entspricht, so daß sie als Kombinationstöne vom Ohre aufgefaßt werden. Sehr schön lassen sich die Kombinationstöne mit der mehrstimmigen Sirene von Dove erzeugen. Versetzt man dieselbe in möglichst rasche konstante Rotation, öffnet zuerst die Reihe mit acht Löchern und danach diejenige mit zwölf Löchern, die das Intervall der Quinte bilden, so hört man deutlich einen schwächeren Kombinationston, der genau eine Oktave tiefer ist, als der tiefere der beiden ursprünglichen Töne. Allgemein geben zwei Töne von den Schwingungszahlen m und n einen Differenzton von der Schwingungszahl $m - n$ und einen Summationston von der Schwingungszahl $m + n$.

Nach Tyndall können die Kombinationstöne bequem und deutlich hörbar gemacht werden mittels passender, sogenannter singender Flammen, die man erhält, wenn man über zwei gewöhnliche Gasflammen zwei Glasröhren setzt, welche mit Papierschiebern versehen sind, um die Länge der Röhren und dementsprechend die Höhe der Töne innerhalb gewisser Grenzen verändern zu können.

Interferenz. Zwei von verschiedenen Erregungspunkten ausgehende Wasserwellenzüge werden sich in ihrer Bewegung verstärken oder auch schwächen können. Sind beide Wellenzüge von gleicher Länge und gleicher Amplitude und befinden sie sich in gleichen Phasen der Bewegung, treffen also in demselben Momente die Wellenberge beider Wellenzüge auf einander, so werden sie sich verstärken, es werden Wellenberge von doppelter Höhe und ebenso Wellenthäler von doppelter Tiefe entstehen. Befinden sich aber die beiden Wellenzüge in verschiedenen Phasen der Bewegung, ist der eine Wellenzug dem anderen um einen Bruchteil einer Wellenlänge voraus, so werden sich die Bewegungen zum Teil verstärken, zum Teil schwächen, und sie werden sich gegenseitig aufheben, wenn die Phasendifferenz eine halbe Wellenlänge beträgt, wenn also Wellenberg des einen Systems mit Wellenthal des anderen Systems zusammentrifft. In derselben Weise nun, wie zwei Wasserwellenzüge, können sich auch zwei Tonwellenzüge verstärken, wenn die Verdichtungsstellen des

einen mit den Verdichtungsstellen des anderen zusammentreffen, und sie können sich schwächen und vernichten, wenn Verdichtungsstellen des einen mit Verdünnungsstellen des anderen zusammentreffen. Man nennt diesen Vorgang **Interferenz** des Schalles. Durch die in Abb. 291 gegebene Anordnung läßt sich sehr schön die Interferenz zweier Stimmgabeln graphisch darstellen und durch die früher besprochene **Lissajoussche** Methode subjektiv und objektiv demonstrieren. Die beiden mit elektromagnetischem Antriebe versehenen Stimmgabeln sind auf zwei soliden Stativen sicher befestigt. Eine derselben, an welche eine berußte Glasplatte angeklemmt werden kann, ist auf einem Schlittenapparat in horizontaler Richtung verschiebbar, während die andere, an die eine feine Schreibspitze angeschraubt werden kann, unverrückbar befestigt ist. Wird nur die eine, mit der Spitze versehene Stimmgabel erregt und die andere unter ihr fortbewegt, so erhält man auf der berußten Glasplatte eine gewöhnliche Sinuskurve. Werden aber beide Stimmgabeln erregt und dann die mit der Glasplatte versehene unter der Spitze fortbewegt, so erhält man, wenn die Stimmgabeln gegen einander verstimmt sind oder sich in verschiedenen Schwingungsphasen befinden, die Kurve Abb. 292, bei der die Anschwellungen den Perioden der Koincidenz, die Zusammenziehungen denen der Interferenz entsprechen.



291. Interferenz zweier Stimmgabeln.

Schlägt man eine Stimmgabel an und dreht sie dann vor dem Ohre um die durch den Stiel gehende vertikale Achse herum, so hört man periodisch abwechselnd ein Anschwellen und ein Schwächerwerden des Tones, und es gibt während einer Umdrehung vier Stellungen, in denen der Ton vollkommen verschwindet, weil die Zinken der Gabel in entgegengesetzter Richtung vibrieren, und in jenen Stellungen der Ton der einen Zinke durch Interferenz mit dem der anderen Zinke vernichtet wird.

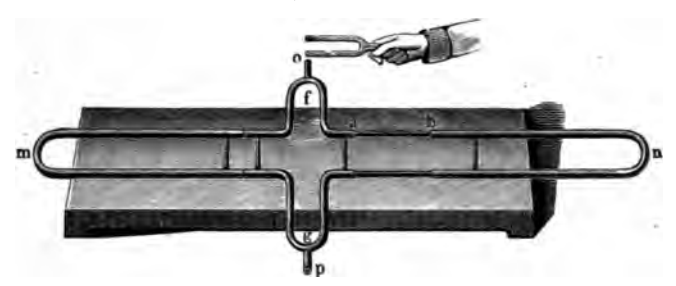
Im Verfolg eines von **John Herrschel** zuerst angegebenen Prinzips konstruierte Quincke ein Röhrensystem, welches sich zur Demonstration der Interferenz sehr gut eignet. Die Röhre o f (Abb. 293) teilt sich bei f gabelförmig in die beiden Zweige f m und f n, die sich bei g wieder vereinigen und in die gemeinschaftliche Röhre g p endigen. Die Länge der beiden Zweige kann dadurch, daß sich die Röhre b n posaunenartig über a b verschieben läßt, sehr verschieden gemacht werden. Hält man an o eine tönende Stimmgabel und an p das Ohr, so hört man, wenn beide Seitenzweige gleich lang sind, so daß die Tonwellen zu gleicher Zeit das Ohr erreichen, den Ton der Stimmgabel. Zieht man aber die Röhre b n so weit aus, bis der rechte Seitenzweig um eine halbe Wellenlänge des Stimmgabeltons länger ist, als der linke Seitenzweig, so hört man die Stimmgabel nicht tönen, weil die beiden Tonwellenzüge sich durch Interferenz aufheben. Der Ton wird wieder sein Maximum erreichen, wenn der rechte Seitenzweig um eine ganze Wellenlänge länger ist, als der linke Seitenzweig. Der Apparat bietet also auch umgekehrt ein Mittel, um bequem die Wellenlänge eines Tones zu bestimmen. Das Vierfache derjenigen Länge a b, um welche der rechte Seitenzweig verlängert werden muß, damit der Ton vollständig verschwindet, ist offenbar die Wellenlänge des Tones.

292. Schwebungen.

Einem größeren Zuhörerkreise kann man das Prinzip der Interferenz mittels einer

Chladnischen Klangscheibe und der von William Hopkins angegebenen Interferenzröhre G (Abb. 294) veranschaulichen. Dies ist eine gabelförmige Röhre, welche an ihrem oberen Ende a mit einer gespannten elastischen Membran verschlossen ist, auf welche feiner Sand gestreut wird. Hält man die Gabel so über die zum Tönen gebrachte Scheibe, daß ihre gabelförmigen Enden sich über zwei einander gegenüberliegenden Sektoren befinden, welche sich in gleichen Phasen der Schwingung befinden, so gerät der Sand auf der Membran in lebhaft hüpfende Bewegung, weil beide Tonwellenzüge in gleichen Schwingungsphasen die Membran treffen; befinden sich dagegen die gabelförmigen Enden über zwei neben einander liegenden Sektoren, die sich in gerade entgegengesetzten Schwingungsphasen befinden, so neutralisieren sich die beiden die Membran treffenden Tonwellenzüge, der Sand bleibt alsdann in Ruhe.

Schwebungen. Eine Folge der Interferenz sind die sogenannten Stöße oder Schwebungen, die man hört, wenn zwei musikalische Klänge von annähernd, aber nicht genau gleicher Tonhöhe gleichzeitig ertönen. Die Tonwellenzüge der beiden Klänge werden abwechselnd koincidieren und interferieren und so abwechselnd Anschwellungen und Schwächungen des Klanges bewirken, welche wir im Ohre als eine Reihe durch Pausen von einander getrennter Stöße, Schläge oder Schwebungen wahrnehmen. Die Anzahl der Schwebungen in der Sekunde ist stets gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Klänge. Die Schwebungen folgen einander um so langsamer, je geringer die Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne ist, und um so schneller, je größer die Differenz der Schwingungszahlen ist. In ernster, getragener Musik sind langsam und regelmäßig erfolgende Schwebungen häufig von ergreifender Wirkung. Folgen die Schwebungen aber zu schnell auf einander, um noch einzeln wahrgenommen werden zu können, so bewirken sie eine gewisse Rauhigkeit des Tones, die dem Ohr ebenso unangenehm ist, wie etwa flackerndes Licht dem Auge, und in dieser Rauhigkeit des Tones besteht nach Helmholtz der wesentliche Charakter der Dissonanz.



298. Interferenzapparat von Quincke.

Die Schwebungen bieten ein sehr sicheres und bequemes Mittel, um zu entscheiden, ob zwei Töne die gleiche Höhe haben, und sie werden auch von den Orgelbauern benutzt, um ihre Orgelpfeifen genau gegen einander abzustimmen.

In neuerer Zeit werden seitens der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Stimmgabeln geprüft durch Zählung ihrer Schwebungen mit Differenzstimmgabeln, die aus der Grundstimmgabel abgeleitet sind. Gleichwie nämlich im Handel und Verkehr die Einheitlichkeit für Maß und Gewicht, so ist für die ausübende Musik, sowie für die Herstellung musikalischer Instrumente die Einheitlichkeit eines genau definierten Grundtones, von dem alle andern Töne abzuleiten sind, von fundamentalster Bedeutung. Die Bestrebungen zur Einführung eines solchen einheitlichen Grundtones reichen bis ins 17. Jahrhundert zurück, aber erst auf der Deutschen Naturforscherversammlung, die im Jahre 1834 zu Stuttgart stattfand, wurde auf den Vorschlag Scheiblers der Beschluß gefaßt, das eingestrichene a mit 440 ganzen (oder 880 halben oder Einzel-Schwingungen) in einer Sekunde als Grundton zu definieren. Der Beschluß gelangte indessen nicht zu allgemeiner praktischer Durchführung. Bei der Pariser Oper wurden im Jahre 1859 durch Gesetz der französischen Regierung für jenes a 870 einfache Schwingungen vorgeschrieben; einige Jahre später schloß sich die Wiener Oper dem französischen Grundton an, während die Opern zu Berlin, zu Brüssel, zu Mailand je ihren eigenen Grundton hatten, dessen Höhe aber auch nicht einmal unverändert festgehalten wurde. Diese Mißstände waren die Veranlassung, daß endlich im Jahre 1885 auf Anregung der österreichischen Regierung in Wien eine internationale „Stimmtonkonferenz“ zustande kam, bei der von deutschen Staaten Preußen, Sachsen, Württemberg und von fremden Staaten

Italien, Rußland und Schweden durch Sachverständige vertreten waren, und die zu dem Beschlusse gelangte, als einzigen **internationalen normalen Stimmton** dasjenige a zu definieren, dessen Höhe durch 870 einfache Schwingungen in der Sekunde bestimmt ist, und zur Darstellung dieses Tones nach wissenschaftlichen Regeln **Normalstimmgabeln** in der Weise zu konstruieren, daß dieselben bei einer Temperatur von 15° C. den Normalton geben. Zur Durchführung dieses im Interesse der praktischen Musikpflege notwendigen Beschlusses sollten die einzelnen Regierungen geeignete Behörden mit der Aufgabe betrauen, ihre Normalstimmgabeln aufzubewahren, nach derselben alle ihr zur Verifikation zukommenden Gabeln zu prüfen, eventuell richtig zu stellen und durch Stempelung zu beglaubigen. Zur Prüfung und Beglaubigung sollen nur solche Gabeln für geeignet und zulässig erklärt werden, die aus nicht gehärtetem Gußstahl hergestellt sind und mit ihrem Stiele aus einem Stück bestehen, deren beide Zinken prismatisch von gleichmäßig rechteckigem Querschnitt und einander parallel sein müssen. Seit dem Jahre 1888 erfolgt auf Grund dieser Bestimmung die Prüfung und Beglaubigung von Stimmgabeln in Deutschland durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zu Berlin-Charlottenburg.



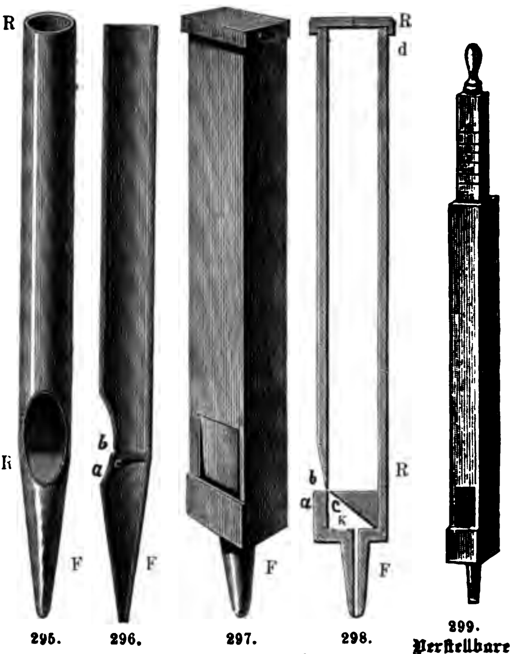
294. Interferenzröhre von Hopkins.

Schwingende Luftsäulen, Pfeifen. Die praktische Musik bedient sich zur Hervorbringung ihrer Töne nicht nur der Instrumente, bei welchen feste Körper, sondern auch solcher, bei welchen luftförmige Körper in Schwingungen versetzt werden. Obgleich ihrem äußeren Aussehen und der Art ihrer Behandlung nach höchst verschieden von den Saiteninstrumenten, beruhen die Blasinstrumente in ihrer Wirkung doch auf ganz analogen Gesetzen der Schwingungen wie jene. Die wellenartigen Luftverdichtungen und Verdünnungen, die stehenden longitudinalen Wellen der Luft in den Pfeifen, verlaufen in ganz entsprechender Weise wie die stehenden Transversalwellen der Saiten, und nur in der Art des Hervorrufens derselben bestehen Verschiedenheiten. Die Höhe des Tones ist durch die Länge der schwingenden Luftsäule im Instrumente bedingt, und diese steht in direkten Beziehungen zu der Länge des Instrumentes selbst, so daß wir die Erklärung der Wirkungsweise sämtlicher Blasinstrumente auf die Betrachtung einer einfachen, geraden cylindrischen Röhre zurückführen können, in welcher die Luft abwechselnd verdichtet und verdünnt wird, ebenso wie wir die Wirkungsweise aller Saiteninstrumente in den Bewegungserscheinungen einer gespannten Saite erklärt finden.

Wenn wir in eine lange, weite, unten offene Röhre hineinblasen, so bewirken wir damit zwar eine Bewegung der eingeschlossenen Luft, aber nur eine gleichmäßig fortschreitende und keine oscillierende, wie sie zur Erzeugung eines Tones notwendig ist. Um einen Ton hervorzubringen, muß die eingeblasene Luft entweder stoßweise in die Röhre eintreten, oder sie muß sich an der mit einer scharfen Kante versehenen Öffnung brechen. Das erstere kann erreicht werden durch eine vor der Mündung der Röhre befindliche vibrierende Lamelle oder **Zunge**, welche jedesmal, wenn sie sich nach der Röhre zu bewegt, eine Verdichtung der vor ihr befindlichen Luftteilchen bewirkt, beim Zurückgehen dagegen eine Verdünnung. Das letztere erzielt man, wenn man die Luft mit den Lippen quer über die Öffnung fortbläst oder den eingeblasenen Luftstrom nötigt, sich an der mit einer scharfen Kante oder **Lippe** versehenen Öffnung zu brechen.

Beide Arten der Tonerzeugung kommen in der Konstruktion der musikalischen Instrumente zur Anwendung. Trompete, Waldhorn, Posaune, Klarinette und Fagott sind Beispiele des ersten Falles, es sind die sogenannten **Zungenpfeifen**; dagegen repräsentieren Orgelpfeifen und Flöten die zweite Art, die sogenannten **Lippen-** oder **Labial-**

oder **Flötenpfeifen**, welche wir zunächst behandeln wollen. Abb. 295 u. 297 zeigen die äußere Ansicht, Abb. 296 u. 298 aber den Durchschnitt derartiger Pfeifen. Der untere Teil F, der Fuß, dient zum Anblasen entweder mit dem Munde oder mittels eines Blasebalgs. Die Luft strömt in die Luftkammer K und, durch einen eingeschobenen Kern c geleitet, gegen die Mundöffnung a b und erleidet hier durch den Anprall an der oberen scharfen Kante b, der Lippe, zunächst eine Verdichtung. Dieselbe dauert zwar nicht lange an, weil die Luft gleich nach außen hin sich verbreiten kann; durch die nachströmende Luftmasse wird aber dasselbe Spiel immer aufs neue wiederholt, und es entstehen so in rascher Aufeinanderfolge Verdichtungen und ihnen entsprechend Verdünnungen der Luftschichten. Die so hervorgebrachten Erschütterungen teilen sich der Luft im Innern der Röhre mit und versetzen sie in isochrone Schwingungen. Da die eingeschlossene Luftsäule am leichtesten aber als ganze Masse schwingt, so wirkt sie durch ihre gewichtigeren Bewegungen auf die Schnelligkeit der an der Mündung entstehenden Wellen ein und reguliert dieselben in ihrer Geschwindigkeit. Jede Pfeife hat demnach ihren besonderen, von der Länge der in ihr schwingenden Luftsäule abhängigen **Grundton**, und zwar ist die Tonhöhe desselben umgekehrt proportional der Länge der Pfeife. Abb. 299 stellt eine bezüglich ihrer Länge verstellbare, mit Stöpsel und Skala für chromatische Tonfolge versehene Labialpfeife dar.

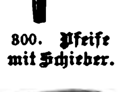


295. 296. 297. 298.
295—298. Offene und gedackte Pfeifen.
299. Verstellbare Labialpfeife.

Die durch Abb. 295 u. 296 dargestellte Lippenpfeife ist am oberen Ende offen; sie liefert einen Grundton, dessen Wellenlänge in der Luft doppelt so lang ist, als die Länge des Rohres R R. Abb. 297 u. 298 dagegen stellt eine gedackte, d. h. eine am oberen Ende verschlossene Pfeife dar. Sie liefert einen Grundton, dessen Wellenlänge in der Luft viermal so lang ist, als die Länge des Rohres R R.

Um eine Vorstellung von der Luftbewegung im Innern einer gedackten Orgelpfeife zu gewinnen, so leuchtet ein, daß die auf einander folgenden Stöße, Verdichtungen, die von a aus auf die innere Luftsäule wirken, sich in der ganzen Länge der Röhre als ein System ebener Wellen fortbewegen werden, bis sie das geschlossene Ende d erreichen; von diesem werden sie vollständig zurückgeworfen und gelangen wieder an die untere Öffnung, laufen so zwischen Öffnung und geschlossenem Ende hin und her. Die untere Schicht der Luft an d bleibt dabei in Ruhe; hier entsteht ein Schwingungsknoten, während das untere offene Röhrenende, an welchem die Luft erschüttert wird, die Mitte einer schwingenden Abteilung bildet. Das Vierfache der Röhrenlänge gibt demnach die ganze Wellenlänge des Grundtones. In der That stimmt der Ton, den eine geschlossene Pfeife von $^1/_2$ Pariser Fuß Länge gibt, völlig mit demjenigen überein, den die Sirene bei 512 Stößen hören läßt. In der Luft legt aber der Schall in der Sekunde 1024 Pariser Fuß zurück, und da die Länge der Wellen gleich dem Raume sein muß, um welchen sich der Schall während der Schwingung eines Luftteilchens fortpflanzt, so muß jede der den obigen Ton erzeugenden Wellen $^{1024}/_{512} = 2$ Fuß lang sein, die Länge der **gedackten** Pfeife beträgt demnach nur den vierten Teil der ihrem Grundtone zugehörigen Wellenlänge. — Bei **offenen** Pfeifen (Abb. 295 u. 296) ist die Luftbewegung im Innern ähnlich derjenigen eines

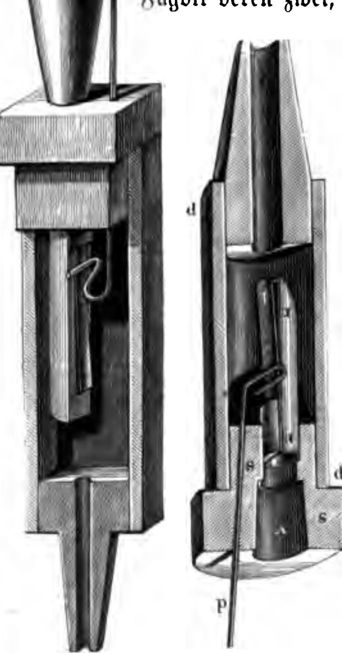
an seinen beiden Enden freien und in seiner Mitte befestigten Stabes, welcher Longitudinalschwingungen ausführt; die beiden Enden sind Stellen stärkster Schwingung, in der Mitte bildet sich ein Schwingungsknoten. Die Röhrenlänge doppelt genommen gibt die ganze Wellenlänge des Grundtones. Sollen demnach eine gedackte und eine offene Orgelpfeife denselben Grundton geben, so muß die offene Pfeife doppelt so lang sein wie die geschlossene. Dies läßt sich durch die in Abb. 300 abgebildete Pfeife leicht nachweisen: dieselbe ist gerade in ihrer Mitte mit einem Schieber S versehen, der zur Hälfte eine der Weite der Röhre entsprechende Öffnung besitzt, so daß durch ihn die Pfeife einmal zu einer gedackten, das andere Mal zu einer doppelt so langen offenen Pfeife gemacht werden kann. In beiden Fällen ist die Höhe des Grundtones dieselbe.


800. Pfeife mit Schieber.

Die Flöte und die meisten Orgelpfeifen sind Labialpfeifen. Bei der Flöte bläst man mit dem Munde gegen die geschärften Ränder ihrer Mundöffnung.

Bei den Zungenpfeifen wird der in sie eingeblasene Luftstrom durch die Schwingungen einer Zunge, d. i. eines elastischen Plättchens, welches die Pfeifenöffnung abwechselnd schließt und öffnet, in eine Reihe von Luftstößen zerlegt. Die Wirkungsweise ist aus der Abb. 301, welche das Innere einer Orgelzungenpfeife im Durchschnitt darstellt, ersichtlich. Die Luft tritt von unten ein, die Zunge kann mittels des gegen sie drückenden Stimmdrahtes kürzer oder länger, und dementsprechend ihr Ton innerhalb gewisser Grenzen höher oder tiefer gemacht werden. Auf das obere Ende der Pfeife ist ein Schallbecher aufgesetzt. Die Klarinette, die Oboe, das Fagott und alle Trompeten sind Zungenpfeifen.

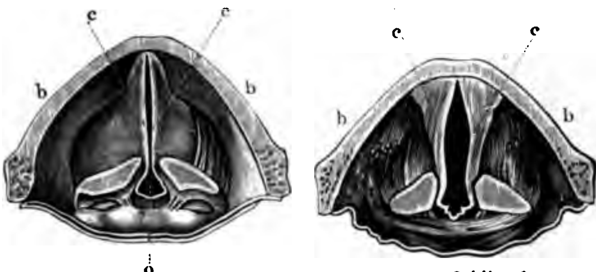
Die Klarinette besitzt eine einzige breite Rohrzunge, die Oboe und das Fagott deren zwei, welche unter einem spitzen Winkel gegen einander geneigt einen schmalen Spalt bilden; beim Horn, bei der Trompete und Posaune, kurz bei allen Blechinstrumenten vertreten die Stelle der Zungen die menschlichen Lippen, welche beim Anblasen in Schwingungen versetzt werden. Das vollkommenste und schönste aller Zungeninstrumente ist aber das menschliche Stimmorgan, bei welchem die elastischen Stimmbänder im Kehlkopfe die Rolle der Zunge spielen. Sie werden durch das Ausströmen der Luft aus den Lungen, beziehentlich in geringerem Maße durch das Einströmen derselben in Schwingungen versetzt. Der Kehlkopf (Abb. 302 u. 303) bildet den oberen Teil der Luftröhre und besteht aus knorpelförmigen Gebilden, welche durch verschiedene Muskeln auf das mannigfaltigste bewegt werden können. Die das Innere des Kehlkopfes bekleidende Schleimhaut, welche eine Fortsetzung der Luftröhre bildet, verengt sich ungefähr in der Mitte des Kehlkopfes zu einem von vorn nach hinten verlaufenden Spalt, der Stimmritze, deren Ränder durch die beiden Stimmbänder gebildet werden. Im ungespannten Zustande, bei welchem keine Tonbildung stattfindet, ist die Stimmritze breit, im gespannten Zustande eng. Von ihrer Verengerung und dem Grade der Spannung der Stimmbänder hängt ihr Schwingungstempo und demgemäß die Höhe und Tiefe des Tones ab, während die Reinheit und Weichheit desselben davon abhängt, daß die Stimmritze während der Schwingung in regelmäßigen Perioden vollkommen geschlossen wird, und ihre Ränder elastisch, rein und frei von jedem Schleimflöckchen sind.




801. Einrichtung der Zungenpfeifen.

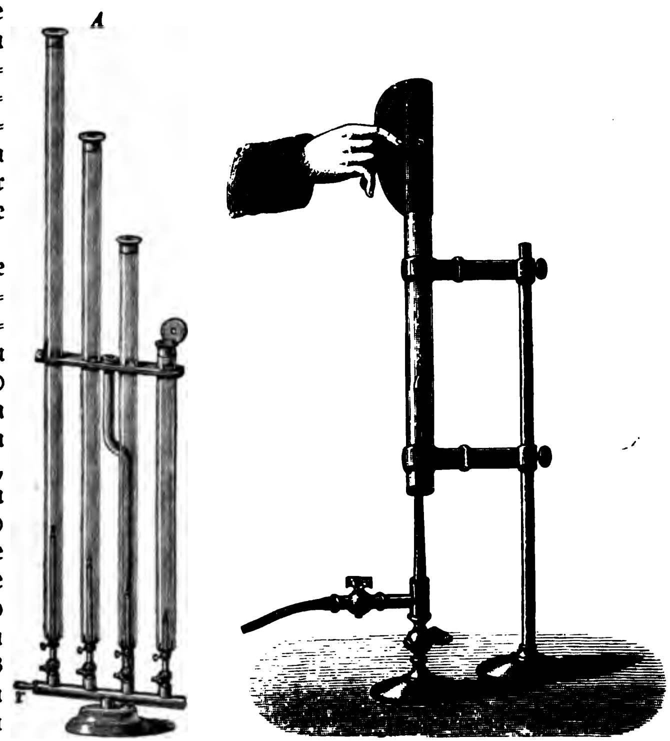
Chemische Harmonie. Die Luft in einer offenen Röhre läßt sich auch in schwingende Bewegung und zum Tönen bringen, indem man die Röhre über eine Wasserstoff- oder

Leuchtgasflamme stülpt. Form und Aussehen der Flamme ändern sich hierbei, sie kommt in eine rhythmische, zitternde Bewegung, welche man leicht wahrnehmen kann, wenn man die Hand mit gespreizten Fingern schnell vor dem Auge hin und her bewegt. Die Höhe des Tones hängt von der Länge der Röhre ab; er wird um so tiefer, je länger die Röhre, und um so höher, je kürzer die Röhre ist. Dies läßt sich durch Herauf- und Herabschieben des Schiebers s leicht nachweisen (Abb. 305). Durch Regulierung der Flammenhöhe läßt sich außer dem Grundton der Röhre auch deren erster und zweiter Oberton hervorbringen. In Abb. 304 ist eine chemische Harmonika für Leuchtgas dargestellt, welche aus vier mit Regulierhähnen versehenen Brennern und aus vier im Durakkord gestimmten Glasröhren besteht, welche einzeln durch Deckelklappen verschlossen werden können, um das Tönen einer Flamme bei fortdauerndem Brennen zu unterbrechen. Graf Schaffgotsch, besonders aber der englische Physiker Tyndall haben sehr interessante Untersuchungen mit empfindlichen Flammen ausgeführt, welche Tyndall in seinem bekannten Werke „Der Schall" in der ihm eigenen fesselnden Weise beschrieben hat.



302. Kehlkopf im gespannten Zustande. 303. Kehlkopf im Ruhezustande.

Ebenso wie die Saite der Violine sich unter gewissen Verhältnissen freiwillig teilt und in einzelnen Abteilungen schwingt, so sind auch die tönenden Luftsäulen unter gewissen Verhältnissen geeignet, sich in aliquote, für sich schwingende Teile zu sondern und dementsprechend Obertöne zu liefern. Würde die Luftsäule in einer Pfeife immer nur in einer und derselben Weise schwingen können, so würde man aus ihr auch immer nur einen einzigen Ton hervorbringen können. In der That sind manche Instrumente, z. B. die Orgel, so eingerichtet, daß jede ihrer Zungen- oder Lippenpfeifen nur je ihren eigenen Grundton und keinen andern liefert. Die meisten Blasinstrumente haben aber den Zweck, außer dem Grundton eine Reihe von Obertönen zu liefern. Dies kann schon durch stärkeres Anblasen erreicht werden, oder auch dadurch, daß man dem Instrumente eine große Länge im Verhältnis zu seinen übrigen Dimensionen gibt und die Länge in geeigneter Weise verändert. Bei der Posaune z. B. kann man die Länge der schwingenden Luftsäule und damit ihren Grundton durch Verlängern oder Verkürzen



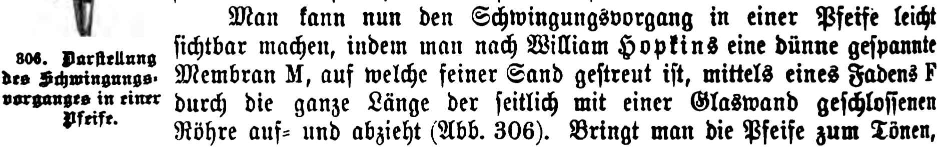
304. Chemische Harmonika. 305. Singende Flamme.

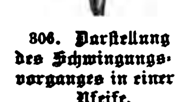
der Röhre ändern. Ähnliches erreicht man bei den Trompeten durch Benutzung der Klappen, bei den Flöten und Klarinetten durch Benutzung der Löcher und Klappen. So vermag der Künstler einem Blasinstrument die verschiedensten Töne zu entlocken, indem er die tönende Luftsäule zwingt, in gewissen Abteilungen zu schwingen nach Regeln und Gesetzen, die analog sind denen, welche wir bei einer schwingenden Saite, die an gewissen Punkten berührt wird, kennen gelernt haben.

Die Reihe derjenigen höheren Töne, welche durch Selbstteilung der schwingenden Luftsäule in einer offenen Röhre entstehen können, wird ausgedrückt durch die Reihe:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C	c	g	c̄	ē	ḡ	b̄	c̿	d̿	e̿	f̿	g̿	a̿	b̿	h̿	c⃛

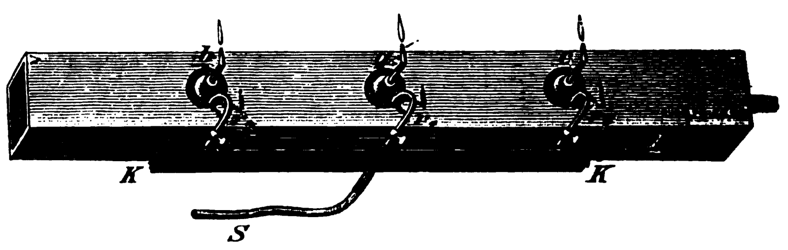
Weiter hinauf rücken die Töne noch enger zusammen. Allen aus einfachen Röhren bestehenden Blasinstrumenten gibt man eine große Länge der Röhre, um die Obertöne möglichst rein und klar zu erhalten; sie werden deshalb auch auf ihren Grundton selten oder nie benutzt. Da die Schwingungszahl der Töne genau bestimmt ist, so eignet sich ein Instrument, welches seine Tonfolge über einem gewissen Grundton aufbaut, für andere Tonlagen wenig oder gar nicht. In der Instrumentierung sind daher für verschiedene Tonlagen gewisse Instrumente in verschiedenen Typen in Gebrauch, deren Röhrenlänge mit der Tiefe ihres Grundtons zunimmt. Es gibt z. B. bei den Hörnern C-Hörner, F-Hörner, E-Hörner, bei den Klarinetten C-Klarinetten, D-Klarinetten, B-Klarinetten, ferner E-Trompeten, Es-Trompeten u. s. w.





306. Darstellung des Schwingungsvorganges in einer Pfeife.

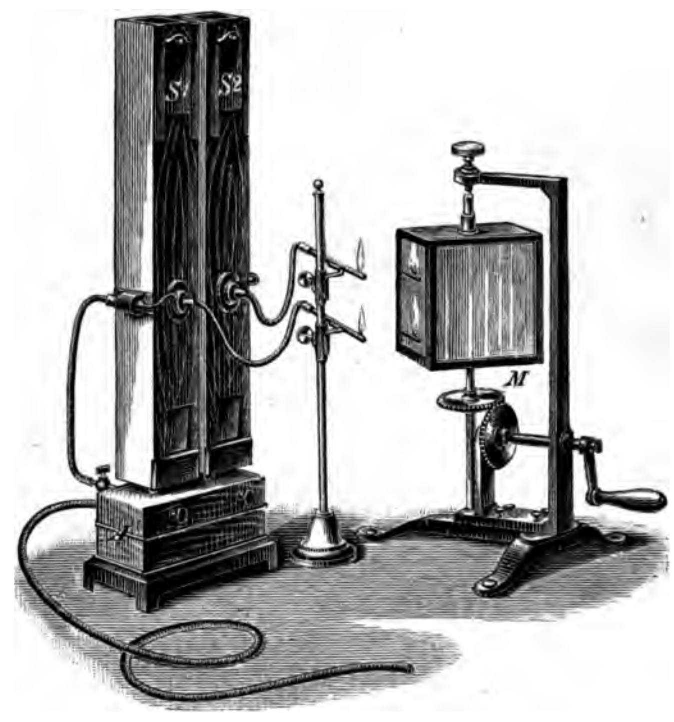
Man kann nun den Schwingungsvorgang in einer Pfeife leicht sichtbar machen, indem man nach William Hopkins eine dünne gespannte Membran M, auf welche feiner Sand gestreut ist, mittels eines Fadens F durch die ganze Länge der seitlich mit einer Glaswand geschlossenen Röhre auf- und abzieht (Abb. 306). Bringt man die Pfeife zum Tönen, so ändert sich zwar der Ton ein wenig dadurch, daß man diesen fremden Körper in die Röhre bringt, er dauert aber ununterbrochen an; man hört, wenn die Membran sich am oberen Ende befindet, ein lautes Schwirren derselben und sieht den Sand auf ihr lebhaft aufwirbeln; senkt man die Membran weiter in die Pfeife hinein, so wird ihr schwirrender Ton und ebenso die Bewegung des Sandes auf ihr allmählich schwächer, und hört vollständig auf, wenn die Membran sich in der Mitte der Pfeife befindet,



307. Darstellung des Schwingungsvorganges nach R. König.

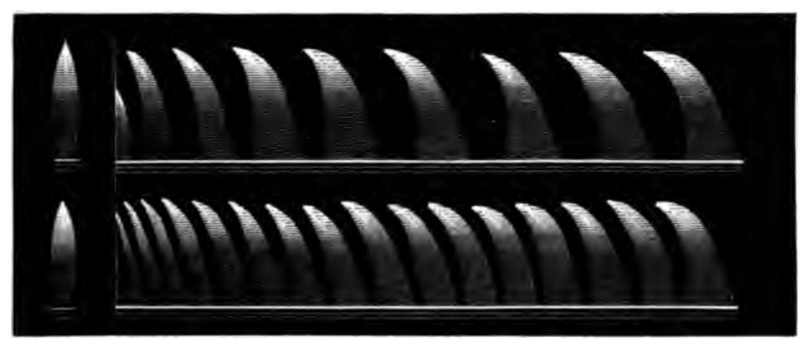
zum Beweise, daß dort ein Knoten der schwingenden Luftsäule ist. Senkt man die Membran noch tiefer hinab, so beginnt wieder ihr schwirrender Ton und das Tanzen des auf ihr befindlichen Sandes und nimmt anhaltend bis zum Boden der Pfeife zu. Wir hören und sehen auf diese Weise, daß, wenn die Pfeife ihren Grundton gibt, ihre Luftsäule in zwei durch einen Knoten getrennten Abteilungen schwingt. An den beiden Enden schwingen die Luftteilchen auf und nieder, ohne merkliche Dichtigkeitsänderungen zu bewirken, während in der Mitte der Röhre, wo sich ein Knoten bildet, die Luft den größten Wechsel der Dichtigkeit erleidet.

Der Schwingungsvorgang und die Knoten in einer tönenden Orgelpfeife können auch in sehr sinnreicher Weise nach dem Vorgange von R. König mittels der sogenannten manometrischen Flammen sichtbar gemacht werden. Abb. 307 stellt eine offene Orgelpfeife mit drei manometrischen Flammen dar. Die eine Wand derselben ist in der Mitte und in gleichen Abständen von der Mitte und den beiden Enden mit drei Löchern versehen, welche durch feine Membranen geschlossen sind. Diese bilden die Böden dreier Kapseln a, b, c, von welchen einerseits drei gebogene Röhrchen r_1, r_2, r_3 in die Kammer KK führen, andererseits drei rechtwinkelig gebogene, mit feinen Ausströmungsöffnungen versehene Brennerröhrchen ausgehen, welche angezündet werden können, wenn durch den Schlauch S in die Kammer K K Leuchtgas geleitet wird; die Flämmchen können durch Hähne reguliert und ganz klein gemacht werden.



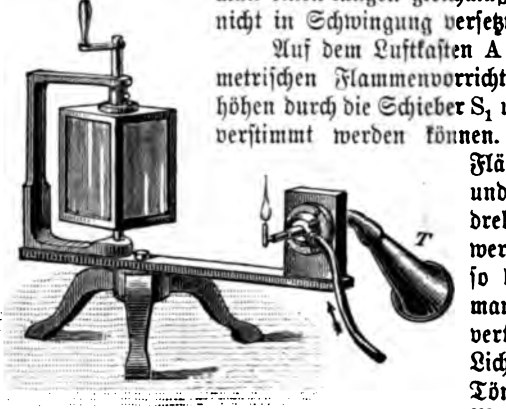
308. Apparat zum Zerlegen der Klänge.

Wird nun der Grundton der Orgelpfeife erregt, so werden auch die drei Flämmchen in Schwingungen gesetzt, und zwar die mittelste am meisten; sie erlischt, während die beiden anderen Flämmchen weiter brennen, als Zeichen, daß in der Mitte ein Knoten vorhanden ist. Bläst man dagegen die Pfeife stärker an, so daß sie ihren ersten Oberton


309. Manometerflammen für den Grundton und seine Oktave.

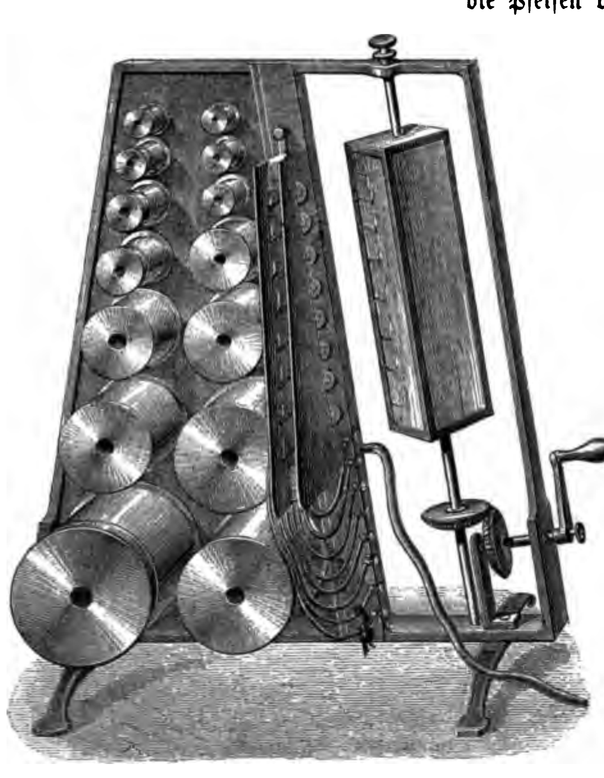
gibt, so verschwindet der Knoten in der Mitte; hier bildet sich jetzt eine Stelle stärkster Schwingung, während bei b und c zwei Knoten entstehen, so daß nunmehr die Flämmchen bei b und c verlöschen, während die mittelste brennen bleibt. Solche manometrische Flammen bilden ein sehr empfindliches Mittel zur Untersuchung der Druck- und Schwingungsverhältnisse tönender Luftsäulen; ihre Form und ihr Aussehen ändern sich bei der Schwingung, ebenso wie jede frei brennende Flamme sehr stark auf einen Schall oder einen Ton reagiert und demgemäß ihr Aussehen ändert. Um die einzelnen Schwingungen

der Flamme beobachten zu können, betrachtet man sie in einem rotierenden Spiegel; man sieht alsdann in dem Spiegel eine Reihe getrennter charakteristischer Lichtbilder, während man einen langen gleichmäßigen Lichtstreifen erblickt, wenn die Flamme nicht in Schwingung versetzt ist, sondern ruhig brennt.



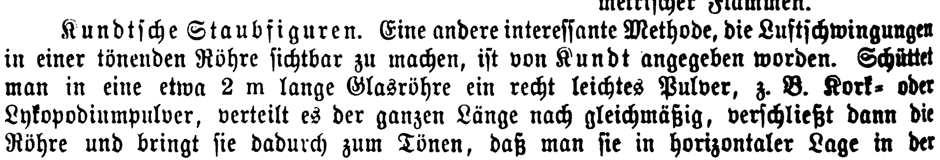
310. Apparat für Vokalklänge.

Auf dem Luftkasten A (Abb. 308) stehen zwei gleiche mit manometrischen Flammenvorrichtungen versehene Orgelpfeifen, deren Tonhöhen durch die Schieber S_1 und S_2 genau abgestimmt oder gegen einander verstimmt werden können. Die den beiden Pfeifen entsprechenden Flämmchen brennen genau vertikal über einander und können in dem durch ein Kurbelgetriebe zu drehenden würfelförmigen Spiegel M betrachtet werden. Wenn die beiden Pfeifen nicht tönen, so brennen die beiden Flämmchen ruhig und man erblickt in dem rotierenden Spiegel zwei vertikal unter einander liegende, lang ausgezogene Lichtstreifen. Bringt man aber die Pfeifen zum Tönen, so teilen sich die Luftschwingungen den Membranen und den Flämmchen mit, und man erblickt in dem rotierenden Spiegel, je nachdem die Pfeifen denselben Ton geben oder Schwebungen mit einander bilden, zwei genau gleiche oder von einander abweichende, in charakteristische Einzelbilder getrennte Reihen. Wählt man nicht zwei gleiche Pfeifen, sondern solche, daß die eine die Oktave des Tones der andern gibt, so erblickt man die beiden in Abb. 309 dargestellten Reihen getrennter Lichtbilder.



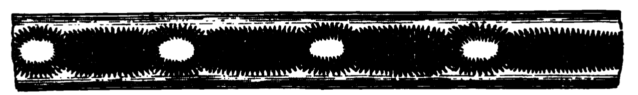
311. Königs großer Apparat zum Studium der Klangfarbe.

Singt man in den Schalltrichter T (Abb. 310) auf eine und dieselbe Tonhöhe nach einander die einzelnen Vokale a, e, i, o, u, so erblickt man in dem Spiegel entsprechende Reihen einzelner Lichtbildchen, welche für jeden Vokalklang verschieden und charakteristisch sind. R. König in Paris hat zum Studium der Klangfarbe der verschiedenen Töne solche manometrischen Flammen mit Resonatoren in Verbindung gebracht. Abb. 311 stellt einen Königschen Apparat mit 14 Universalresonatoren dar für die Zerlegung der Klänge in einfache Töne vermittelst manometrischer Flammen.



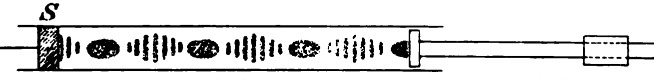
Kundtsche Staubfiguren. Eine andere interessante Methode, die Luftschwingungen in einer tönenden Röhre sichtbar zu machen, ist von Kundt angegeben worden. Schüttet man in eine etwa 2 m lange Glasröhre ein recht leichtes Pulver, z. B. Kork- oder Lykopodiumpulver, verteilt es der ganzen Länge nach gleichmäßig, verschließt dann die Röhre und bringt sie dadurch zum Tönen, daß man sie in horizontaler Lage in der

Mitte festhält oder einspannt und über die eine Hälfte mit einem feuchten Tuchläppchen reibt, so teilen sich die Longitudinalschwingungen der Röhre der eingeschlossenen Luft und dem leichten Pulver mit, und letzteres ordnet sich in der durch Abb. 312 dargestellten regelmäßigen Form an, welche uns zeigt, in welchen Abteilungen die Luftsäule ihre Schwingungen ausführt. Die Abbildung stellt nur einen Teil der Röhre dar. Die kreisförmigen Stellen deuten die Knoten an, zwischen denen das Pulver sich in senkrecht zur Längsachse gerichteten Querstreifen, Rippen, anordnet. Die Entfernung zweier Knoten entspricht der halben Wellenlänge des Tones in Luft; die Länge der longitudinal und in gleichem Rhythmus mit der Luft schwingenden Glasröhre entspricht aber auch der halben Wellenlänge im Glas. So oft also die Entfernung zweier Knoten in der Länge der Glasröhre enthalten ist, um soviel mal schneller pflanzt sich der Schall im Glase schneller als in der Luft fort. Die Kundtsche Methode bietet also zugleich ein bequemes Mittel zur Lösung einer wichtigen physikalischen Aufgabe, nämlich zur Bestimmung des Verhältnisses der Schallgeschwindigkeit in Glas und Luft und, da wir weiter die Röhre mit verschiedenen Gasen, mit Wasserstoff, mit Kohlensäure u. s. w. füllen können, zur Bestimmung des Verhältnisses der Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Gasen. Sie ergibt sich in Kohlensäure kleiner, in Wasserstoff größer als in Luft. Je dichter das Gas ist, um so geringer ist die Schallgeschwindigkeit in ihm, und zwar ergibt sie sich umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte, ferner nimmt sie mit wachsender Temperatur zu und ist endlich auch abhängig von der Elastizität des Gases.



312. Kundtsche Staubfiguren.

Nach einer ähnlichen, von Kundt angegebenen Methode läßt sich auch die Schallgeschwindigkeit in longitudinal geriebenen Stäben verschiedener Substanzen bestimmen. Zu diesem Zwecke wird der betreffende Stab in horizontaler Lage in seiner Mitte festgeklemmt (Abb. 313) und über das eine mit einem dünnen Korkplättchen versehene Ende eine weitere Glasröhre gestülpt, welche der Länge nach mit Kork- oder Lykopodiumpulver oder mit Kieselsäure gefüllt ist, und deren Länge durch einen verschiebbaren Stempel S verändert werden kann. Bringt man nun den Stab, indem man die eine freie Hälfte mit einem feuchten Tuche anreibt, zum Tönen, so erzeugen seine Longitudinalschwingungen auch in der Glasröhre stehende Luftschwingungen, durch welche der Staub in periodische



313. Kundtsche Röhre zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit.

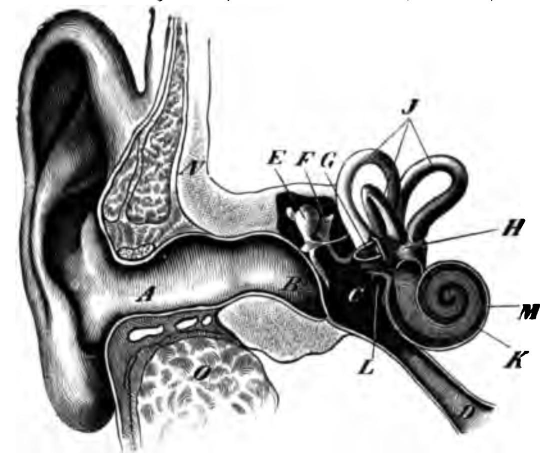
Figuren angeordnet wird. Durch Verschiebung des Stempels S läßt sich leicht diejenige Länge auffinden, für welche das Aufwirbeln des Staubes am heftigsten und die Figurenbildung am schärfsten ist. Ist dann l die Entfernung zweier Knoten und L die Länge des geriebenen Stabes, so gibt das Verhältnis $\frac{L}{l}$ an, um wieviel mal sich der Schall in dem betreffenden Material schneller fortpflanzt, als in der Luft; er pflanzt sich demnach $331 \cdot \frac{L}{l}$ Meter in der Sekunde fort, wobei zu bemerken ist, daß diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich auf die Temperatur von 0° C. bezieht, und daß sie mit steigender Temperatur größer wird. In Stahl beträgt sie bei mittlerer Temperatur etwa 5000 m, in Kupfer 3560 m.

Das menschliche Ohr. Da der Schall die Eigentümlichkeit hat, sich in festen Körpern besser als in freier Luft fortzupflanzen, da ferner der Kopf der Menschen und Tiere zum großen Teile aus festen Körpern, den Knochen, besteht, so kann das Organ zur Aufnahme und Übermittelung der Schallwellen an das Nervensystem tiefer und gegen äußere schädliche Einflüsse geschützter liegen, als das Auge.

Man unterscheidet einen äußeren, einen mittleren und einen inneren Teil des Gehörorgans. Der äußere (Abb. 314) umfaßt Ohrmuschel, äußeren Gehörgang A und

Trommelfell B, der mittlere Trommel- oder Paukenhöhle C, Ohrtrompete D und Gehörknöchelchen E, F, G, und der innere Teil wird vom Labyrinth H—M gebildet.

Die Ohrmuschel mit dem trichterförmigen äußeren Gehörgang A dient zur Übermittelung der das Ohr treffenden Schallwellen an das Trommelfell. Der Gehörgang wird vorn von Knorpel, weiter hinten vom Schläfen- und Felsenbein N umgeben und liegt so ganz sicher in die festesten Schädelknochen eingebettet. Die den Gehörgang bekleidende Haut trägt zahlreiche Härchen, die das Eindringen von Fremdkörpern verhindern, und Drüsengänge, welche von O aus Ohrenschmalz absondern, um den Gehörgang und das Trommelfell geschmeidig zu halten. Den Abschluß der äußeren Gehörteile bildet das Trommel- oder Paukenfell B, eine schrägliegende sehnige Haut in einem knöchernen Ringe, welche als Membran die von außen kommenden Wellen an die Paukenhöhle C übermittelt. Diese steht mit der äußeren Luft durch die Eustachische Röhre oder Ohrtrompete D in Verbindung, welche in den oberen Teil der Schlundhöhle mündet. Der Zweck dieser Röhre besteht darin, eine Sprengung des Trommelfelles durch zu starke Schallwellen zu verhüten, indem diese sowohl durch den äußeren Gehörgang, als auch durch die Eustachische Röhre, also von beiden Seiten des Trommelfelles, Zutritt zu demselben erhalten.



314. **Das Gehörorgan der rechten Seite, bloßgelegt;** die inneren Teile vergrößert und das Labyrinth der größeren Deutlichkeit wegen nach vorn gedreht. A Äußerer Gehörgang, B Trommelfell, C Paukenhöhle, D Ohrtrompete. Die Gehörknöchelchen: E Hammer, F Amboß, G Steigbügel, H Vorhof des Labyrinths, J die drei Bogengänge, K Trommelhöhlentreppe, zum runden Fenster L führend, M Vorhoftreppe, N Schläfenbein, O Ohrspeicheldrüse.

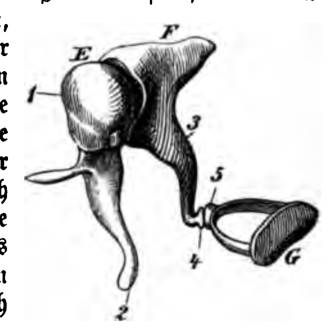
In der Paukenhöhle liegen die Gehörknöchelchen (Abb. 315), welche die Schwingungen des Trommelfelles an das Labyrinth vermitteln. Sie heißen Hammer E, Amboß F und Steigbügel G. Der Stiel des Hammers (2) ist mit dem Trommelfell verwachsen; sein Kopf (1) liegt auf dem Amboß, und dessen Fortsatz (3) mittels des Linsenkörperchens (4) am Gelenk (5) des Steigbügels, der mit der Membran im ovalen Fenster des Labyrinths bis auf einen schmalen Rand verwachsen ist. Hammer und Amboß tragen die Bewegungswellen für die Gehörknöchelchen, indem sie durch Muskelbänder mit der umgebenden Höhlenwand verwachsen sind.

Das innere Ohr besteht aus dem Vorhof A (Abb. 316), der Schnecke B und den drei Bogengängen C_1, C_2, C_3. Außer dem schon erwähnten ovalen Fenster, das in den Vorhof mündet, steht das Labyrinth mit der Paukenhöhle noch durch das Ende der Schnecke, das runde Fenster L (Abb. 314) oder kleine Trommelfell in Verbindung. Die drei Bogengänge sind drei rechtwinkelig zu einander stehende, halbkreisförmige Knochenkanäle, welche die Ampullen a_1, a_2, a_3 (Erweiterungen) und schlauchartigen Fortsätze des elliptischen Säckchens b_2 aufnehmen und wie das ganze Innere des Labyrinths mit dem Labyrinth- oder Gehörwasser angefüllt sind. Das runde Säckchen b_1 sendet seine schlauchartigen Fortsätze in die Schnecke.

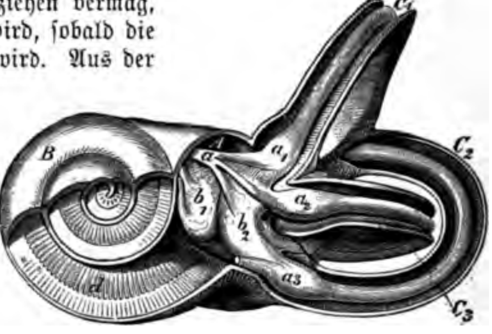
Der Gehörnerv teilt sich im Vorhof in zwei Äste, welche durch die beiden Säckchen in die Bogengänge, bezw. in die Schnecke gelangen. In der Schnecke selbst läuft er in die Cortische Membran aus, die etwa 3000 Fasern enthält, welche klaviaturähnlich auf beiden Seiten der die Schnecke halbierenden Spiralplatte befestigt sind, und von denen wahrscheinlich jede einzelne auf nur einen ganz bestimmten Ton abgestimmt ist und regaiert. Einer Entdeckung von Max Schultze zufolge findet die unmittelbare Übermittelung der Schwingungen des Labyrinthwassers an den Gehörnerv erst mittels sog. Hörhärchen statt; dies sind mikroskopisch kleine haarförmige Lamellen, welche durch die Schwingungen der Cortischen Fasern, sowie durch die des Wassers erregt werden, und ihre Vibrationen den zwischen ihren Wurzeln liegenden Nervenausläufern mitteilen.

Der Gang der Schallwellen ist also folgender: durch das äußere Ohr und den äußeren Gehörgang gesammelt, versetzen sie das Trommelfell in Schwingungen, die mittels der Gehörknöchelchen nach dem ovalen Fenster und ins Labyrinth übermittelt werden. Durch die Schwingungen der Luft in der Paukenhöhle gelangen die Schallwellen ferner durch das runde Fenster in den Vorhof, von wo sie durch das Gehörwasser, die Ampullen und Schläuche, sowie durch die Cortischen Fasern den Gehörnerven und weiter dem Gehirn übermittelt werden.

So mannigfach und verworren auch die Wellenzüge sein mögen, die an unser Ohr schlagen, dasselbe besitzt im höchsten Grade die Fähigkeit, die zusammengehörigen Erschütterungen von einander zu sondern und sie auf ihre einzelnen Ursachen zurückzubeziehen. Wir unterscheiden in dem Geräusch, das ununterbrochen die Außenwelt erfüllt, das Rollen der Wagen, das Lachen, Sprechen, Singen der Menschen, das Vogelgezwitscher, das Ticken der Uhr und welches immer die Laute, die Geräusche und Töne des bewegten Lebens sein mögen, wir können sie sicher analysieren, obgleich sie alle zusammen und auf einmal durch die hin und her gehende Bewegung der Gehörknöchelchen auf unser Labyrinthwasser wirken. Der Gehörapparat ist in dieser Beziehung unendlich bewunderungswürdig und viel feiner als selbst das Auge organisiert, welches zwar, wenn es auf den Spiegel eines Teiches blickt, in den wir an zwei oder drei verschiedenen Stellen Steine geworfen haben, aus dem gekräuselten, durch Übereinanderlagerung der verschiedenen Wellensysteme gebildeten Wellennetz die einzelnen Ringsysteme heraus erkennen und auf ihre besonderen Ursachen zurückzubeziehen vermag, aber von dieser Fähigkeit im Stich gelassen wird, sobald die Zahl der Erschütterungspunkte eine größere wird. Aus der Tonflut einer vollen, bewegten Orchestermusik lösen wir dagegen die Tonfiguren jedes einzelnen Instrumentes aus, und ein geübtes Ohr vermag leicht unter Hunderten von Sängern einen Falschsingenden herauszuhören.



815. Gehörknöchelchen.



816. Das Labyrinth,
stark vergrößert und zum Teil geöffnet. A Vorhof, B Schnecke, C_1, C_2, C_3 die drei Bogengänge des Labyrinths, a Ast des Gehörnervs, a_1, a_2, a_3 flaschenförmige Erweiterungen (Ampullen) der Bogengangsschläuche, b_1 kugelförmiges, b_2 elliptisches Säckchen, d Spiralplatte.

Die Telephonie. Den Schluß dieses Abschnittes soll die Beschreibung zweier Apparate bilden, deren Erfindung nicht nur jederzeit zu den glänzendsten der Wissenschaft zählen wird, sondern von denen der eine in verhältnismäßig kurzer Zeit auch von hervorragendster praktischer Bedeutung, ja man kann wohl sagen, bereits zu einem unentbehrlichen Faktor unseres modernen Gesellschafts- und Verkehrslebens geworden ist. Man würde es in früherer Zeit nicht nur, sondern noch in den fünfziger Jahren unseres Jahrhunderts für eine phantastische Träumerei erklärt haben, wenn ausgesprochen worden wäre, daß es möglich sei, durch den Telegraphendraht auf Hunderte von Meilen sich mit einem Menschen zu unterhalten, so daß dieser mit seinem Ohr unsere Stimme mit allen ihren Eigentümlichkeiten und Nüancen vernehmen, daß er unser Lachen und die Melodie hören solle, die wir singen, genau so, als ob er neben uns stände. Und doch ist dieses vermeintliche Phantasiegebilde bis zu einem hohen Grade der Vollkommenheit zur Wirklichkeit geworden.

Dem Oberlehrer Philipp Reis in Frankfurt a. M. gebührt das Verdienst, zuerst den Gedanken gehabt und realisiert zu haben, den elektromagnetischen Telegraphen zu benutzen, um unsere Stimme in weite, ferne Länder hin vernehmbar zu machen. Der elektromagnetische Apparat spielt in diesem weit verzweigten Gehörwerkzeug die Rolle der Gehörknöchelchen, welche die Erschütterungen von einer Membran zu einer anderen weit

entfernten unter Vermittelung der magnetischen Schwingungen eines Eisenstabes fortpflanzen.

Das Reissche Telephon ist in Abb. 318 dargestellt und hat folgende Einrichtung: Auf der Station I befindet sich ein hohles, vorn mit einer Schallöffnung A versehenes Kästchen, welches an seiner oberen Fläche eine Öffnung hat, die mit einer feinen, straff gespannten Membran verschlossen ist. Auf dieser Membran liegt ein feines Platinplättchen p, und darauf trifft die Spitze eines federnden Platinstiftes n, der so reguliert ist, daß er das Plättchen p, wenn die Membran in Ruhe ist, gerade berührt, und daß die Berührung unterbrochen wird, wenn die Membran hin und her schwingt. Durch diese abwechselnde Berührung und Freilassung wird ein elektrischer Strom geschlossen und unterbrochen, der von einer Bunsenschen Batterie B (3—4 Elemente) aus durch die Klemmschraube a in das Platinplättchen p und durch den Stift n in die zweite Klemmschraube b geleitet wird, von welcher der Leitungsdraht nach der Station II geführt wird, um hier die Spirale C C zu durchlaufen und durch die Klemmschraube d und den mit ihr verbundenen Draht e zur Batterie zurückzukehren. In der Mitte der Spirale liegt ein dünner Eisendraht, der mit seinen beiden Enden in zwei auf dem Resonanzboden g g ruhenden Stegen f f befestigt ist. Die Teile h i und k l auf beiden Stationen bilden eine Telegraphenvorrichtung, um dem entfernten Hörer den Beginn der Mitteilung zu signalisieren.



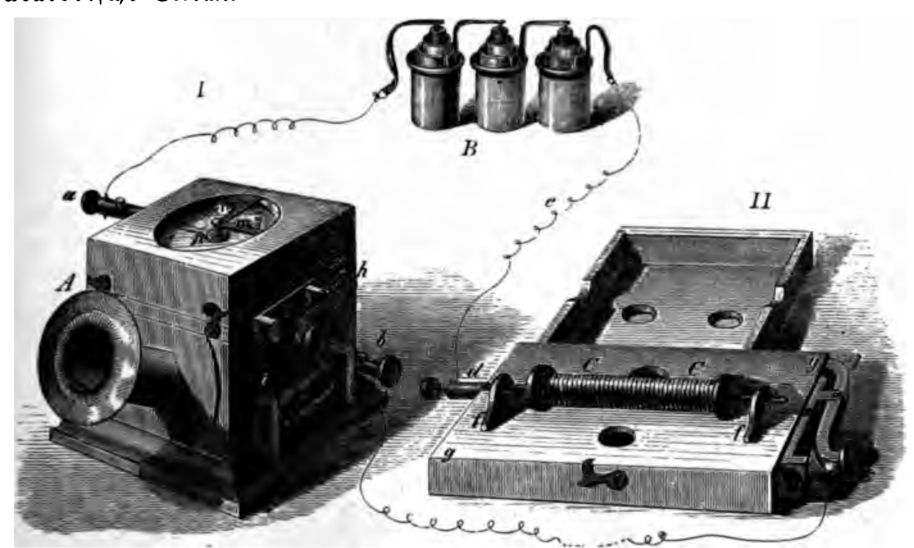
317. Philipp Reis.
Nach dem Medaillonporträt an seinem Denkmale zu Friedrichsdorf bei Homburg.

Das Wiedergeben des in den Schallbecher A hineingesungenen Tones beruht nun darauf, daß das Eisenstäbchen, so oft es durch den in der Spirale kreisenden elektrischen Strom magnetisiert und entmagnetisiert wird, in Longitudinalschwingungen gerät, die als Ton wahrgenommen werden, entsprechend dem am Aufgabeort in den Apparat gesungenen Ton, durch dessen Schwingungen die Membran erregt wurde. Der Resonanzboden dient zur Verstärkung des Tones.

Reis hat mit seinem Apparat bereits im Oktober 1861 Versuche angestellt, die ein befriedigendes Resultat ergaben. Eine mäßig laut gesungene Melodie wurde in einer Entfernung von 100 m durch den Reproduktionsapparat deutlich wiedergegeben. Indessen litt der Reissche Apparat noch an Unvollkommenheiten, welche seiner Einführung in die Praxis hindernd im Wege standen.

Er konnte nämlich zwar die Tonhöhe und bis zu gewissem Grade auch die relativen Tonstärken wiedergeben, nicht aber die Klangfarbe, die gerade für das Telephonieren des gesprochenen Wortes von größter Wichtigkeit ist. Denn wie wir gesehen haben, ist neben der Schwingungszahl, welche die Tonhöhe, und der Schwingungsweite oder Amplitude, welche die Tonstärke bedingt, gerade die Schwingungsform, die durch die Obertöne bedingt wird, wesentlich für den individuellen Charakter der Klangfarbe der verschiedenen musikalischen Instrumente und ganz besonders für die Klangfarbe der mensch-

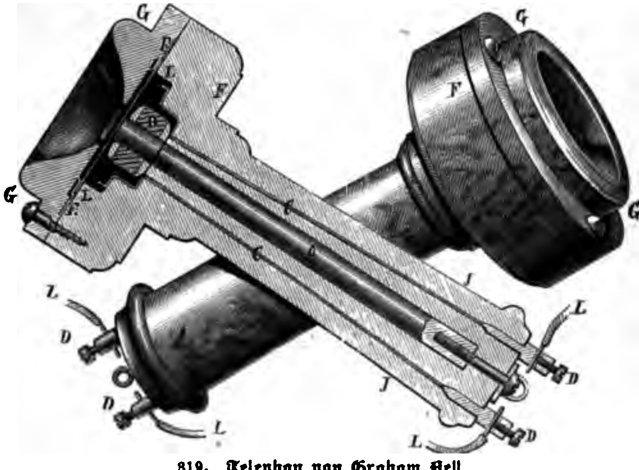
lichen Stimme, der Sprache. Die Schwingungsform läßt sich aber durch eine Folge von gesonderten Stromstößen (pulsatorische Ströme nennt sie Bell) nicht gut wiedergeben, wohl aber durch allmähliches Anschwellen und Abnehmen des Stromes. Im Gegensatz zu den pulsatorischen Strömen nennt Bell die Stromänderungen undulatorische Ströme.



318. Das Reissche Telephon.

Das Reissche Telephon vermochte solche undulatorischen Ströme nicht zu erzeugen. Die Stromstöße des Tonsenders riefen auch nur stoßweise Magnetisierungen des Empfängers hervor, und die Folge davon war, daß die eigentliche Lautübertragung gestört und verdeckt wurde durch die kräftigeren Erschütterungen, die das mit jeder Schwingung verbundene Öffnen und Schließen des konstanten Stromes hervorbrachte.

Zur deutlichen Lautwiedergabe ist es notwendig, daß der Tongeber ebenso wie der Empfänger durch einen allmählich anschwellenden Strom aus der Ruhelage in seine äußerste Lage getrieben und beim Abnehmen des Stromes wieder in seine ursprüngliche Ruhelage und darüber hinaus getrieben wird. Die Lösung dieses Problems gelang in überraschend einfacher, genialer Weise dem aus Edinburg gebürtigen Professor Alex. Graham Bell in Boston im Jahre 1877.



319. Telephon von Graham Bell.

Das Bellsche Telephon ist in Abb. 319 dargestellt und folgendermaßen eingerichtet: Ein permanenter Magnetstab A ist an dem einen Polende von einer kurzen Induktionsspirale B umgeben, die aus feinem übersponnenen Kupferdraht gewickelt in zwei dickeren Drähten CC endigt, die durch Klemmschrauben DD weiter mit den Leitungsdrähten LL in Verbindung gebracht werden. Dem einen Polende des Magnets steht

eine an den Rändern eingespannte, aus weichem Eisenblech hergestellte **Membran** EE gegenüber.

Das Ganze ist in eine Holzfassung eingefügt, welche in dem Teile GG über der Membran EE eine trichterförmige Ausbohrung hat, die als Schalltrichter dient; nach unten zu wird die Holzfassung schmaler, da sie hier nur den Magnetstab, der durch eine Schraube in seiner Lage festgehalten wird, und die beiden Leitungsdrähte CC zu umschließen hat. Auf der Gebe= wie auf der Empfangsstation denken wir uns nun je ein solches Telephon und ihre Induktionsspiralen durch die Leitungsdrähte LL und die Klemmschrauben DD mit einander verbunden. Die Wirksamkeit des ganzen Systems ist nun leicht verständlich.

Wird nämlich der Schalltrichter GG als Mundstück behandelt und in denselben hineingesprochen, so gerät die Membran EE vor dem Pole des Magnets in Schwingungen; infolge dieser Schwingungen ändert sich ihr magnetischer Zustand und derjenige des Magnetpols, und es werden in der Spirale B Induktionsströme erzeugt, welche in ihrem Verlaufe den die Membran erregenden Schallschwingungen entsprechen und durch die Leitungsdrähte LL auf die Spirale des empfangenden Telephons fortgeleitet werden.



320. Verbindung des Bellschen Telephons.

Indem diese auf den Magnetpol einwirken, ändern sie dessen magnetischen Zustand und dadurch dessen magnetische Wirkung auf die vor ihm befindliche federnde Membran. Die letztere gibt dieser Einwirkung nach, sie gerät in Schwingungen, die in Betreff ihrer Zahl und Form mit den Schwingungen der erregenden Membran übereinstimmen. Durch die Membran des zweiten Telephons, des Empfängers, werden also die von der Membran des ersten, des Gebers, kommenden elektrischen Ströme wieder als Schallschwingungen an die Luft unseres Gehörganges abgegeben; man braucht also nur den Schalltrichter des zweiten Telephons an das Ohr zu halten, um dieselben wahrzunehmen. Dasselbe Telephon kann also in doppelter Weise als Sprachrohr und Hörrohr benutzt werden.

Es kann hier um so weniger auf die mannigfachen Modifikationen und Verbesserungen, welche das Telephon durch Siemens, durch Edison, durch Ader, durch Böttcher u. a. erfahren hat, eingegangen werden, als die Telephonie eine eingehende Berücksichtigung im dritten Bande des „Buches der Erfindungen" erfährt. Ebenso kann hier nur auf den hohen Grad der Empfindlichkeit und der Sicherheit der Funktionierung hingewiesen werden, welchen das Telephon durch seine Verbindung mit dem Mikrophon in der Praxis erreicht hat, wodurch es heute schon zu einem für den Handels= und wirtschaftlichen Verkehr unentbehrlichen Faktor geworden ist. Alles Dies wird an jener Stelle im Zusammenhang mit den andern elektrischen Verkehrseinrichtungen in ausführlicher

Weise dargestellt. Hier möge nur noch erwähnt werden, daß Dr. Froelich die Bewegungen der Telephonmembran beim Singen und Sprechen sichtbar gemacht und dadurch untersucht hat, daß er über derselben eine Königsche Kapselmembran mit tanzender Flamme anbrachte, welche im rotierenden Spiegel beobachtet wurde. Es ergab sich aus der Natur der Flammenbilder die Bestätigung der in der Praxis beim telephonischen Sprechen gemachten Beobachtungen, daß von den Vokalen i bedeutend schlechter als alle anderen, a und o am besten wiedergegeben werden, und daß die Schwingungen der Telephonmembran zwar denjenigen der Stimme ähnlich, aber immer etwas komplizierter ausfallen, endlich, daß wenn man Konsonanten in das Telephon hineinspricht, man fast gar keine oder nur geringe Flammenzuckungen erhält.

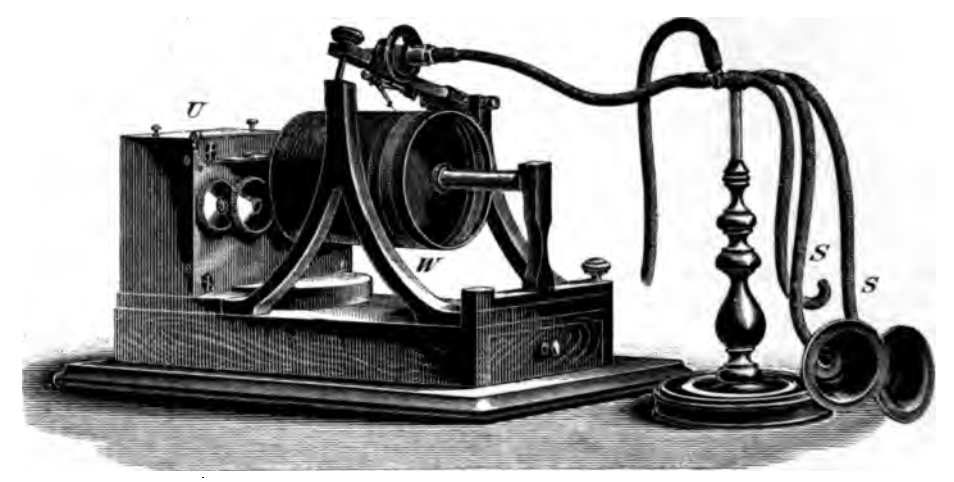
Der Phonograph. Noch überraschender und wunderbarer als das Telephon erscheint jedoch eine Erfindung, die es nicht nur ermöglicht, das gesprochene Wort und die gesungene oder von einem Instrumente, ja von einem ganzen Orchester gespielte Melodie über weite Entfernungen hinwegzuleiten, sondern sie auch in all ihrer Eigenart lange Zeit aufzubewahren, so daß nach einer beliebigen Reihe von Jahren die Stimme wieder erweckt werden, dasselbe Lied wieder ertönen, dieselbe Melodie wieder gespielt werden kann, und zwar mit dem gleichen Ausdruck, mit dem sie im Moment ihrer Aufnahme gesprochen, gesungen oder gespielt wurden. Diese interessante und merkwürdige von Edison im Jahre 1877 gemachte Erfindung ist der Phonograph. Thomas Alva Edison, der in hohem Grade das amerikanische Erfindertalent besitzt, wurde am 11. Februar 1847 in Milan, einem kleinen Kanalstädtchen des Kreises Erie (Ohio), geboren. Er verbrachte die ersten zwölf Jahre seines Lebens in Port Huron (Michigan) und ließ sich dann bei der Grand-Trunk-Railway als train-boy anstellen. Aus dieser frühen Zeit wissen wir nur wenig Erwähnenswertes. Der einzige hervorstechende Zug seines Wesens war seine außerordentliche Vorliebe für Lektüre, die ihm bis heute in unverändertem Maße geblieben ist. Auf der Bahn richtete er in einem alten Packwagen eine Druckerei und ein chemisches Laboratorium ein. In der ersteren druckte er den „Grand-Trunk-Herald“, im letzteren wurden chemische Experimente angestellt, die gewöhnlich mit einem kleinen Brande oder einer Explosion endigten. Diese Vorgänge waren typisch für Edisons Jugend; die mannigfaltigsten Ideen und Pläne beschäftigten ihn, zu deren Ausführung indessen seine wissenschaftliche Vorbildung nicht ausreichte. Im Alter von 21 Jahren kam Edison nach Boston und von dort nach New York, wo ihm das Glück zu lächeln begann. Hier machte er die Erfindung einer Art Druckmaschine, deren Verkauf ihm einige Mittel einbrachte. Später wurde er Direktor der Gold-Indicator-Company und richtete in Newark (New Jersey) eine Werkstatt zur Herstellung seiner Maschinen ein. Aber er wollte nicht Werkstattbesitzer, sondern Erfinder sein und verlegte deshalb seinen Wohnsitz nach Menlo-Park, wo er emsig an der Vervollkommnung der Glühlampen



321. Thomas Alva Edison.

arbeitete. Nach einigen Jahren zog er, weil sich sein Laboratorium als zu klein erwiesen hatte, nach Llewellyn-Park (Orange, New Jersey) und baute sich dort ein Laboratorium, welches das beste und großartigste seiner Art in der ganzen Welt sein soll.

Doch nun zum Phonographen! — Das Prinzip der Sprechmaschine, des Phonographen, ist im wesentlichen das des Telephons. Die Schallwellen werden mittels eines Sprachrohres gegen eine aus äußerst dünnem Glas oder Glimmer bestehende Membran geleitet und von dieser mittels eines Stichels auf eine schnell unter demselben rotierende (bei den ersten Modellen mit Stanniol bekleidete) Walze verzeichnet. Man erhält auf diese Weise auf dem Stanniolstreifen Eindrücke, deren Form der Schwingungsform der Membran, resp. der sie treffenden Tonwellen entspricht. Dieser Stanniolstreifen läßt sich nun in demselben Apparate wieder zur Hervorrufung derselben Töne benutzen, indem, ähnlich wie beim Bellschen Telephon, der umgekehrte Vorgang dadurch eingeleitet wird, daß der an der Membran sitzende Stichel durch gleichmäßig schnelles Vorbeibewegen des Stanniolstreifens längs der von ihm vorher gezogenen Furchen geführt wird. Auf diese Weise muß nämlich der Stichel jetzt als Geber alle Bewegungen wiederholen, welche er vorher als Empfänger ausführte. Infolgedessen muß er auch die Membran wieder in dieselben

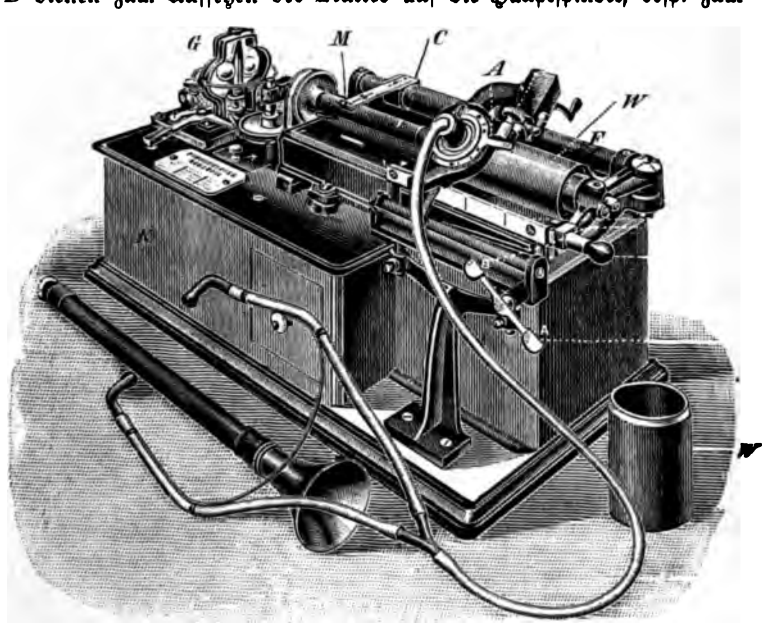


322. Einfacher Edisonscher Phonograph.

Schwingungen versetzen, die sie selbst vorher, infolge Erregung durch die Stimme oder den Ton eines Instrumentes auf ihn übertragen hatte; die Membran muß also in ähnlicher Weise wie die Membran eines Telephons erklingen. In der That, der Phonograph spricht, singt, pfeift uns alles nach, und zwar so oft wir's wollen. So oft der Stanniolstreifen unter dem Stichel wieder vorbeigezogen wird, erklingt immer wieder dieselbe Tonfolge mit demselben Ausdruck, nur langsamer oder schneller, je nachdem die Walze gedreht wird. Trotz seiner überraschenden Leistung hat sich aber der Phonograph noch eigentlich wenig im praktischen Leben einzubürgern vermocht; er gehört zur Zeit noch zu der Zahl interessanter Apparate, die zwar von hohem wissenschaftlichen Interesse sind, aber vorwiegend theatralischen Zwecken dienen.

In Abb. 322 ist ein einfacher Phonograph mit mehreren Sprach- resp. Hörrohren S dargestellt, dessen Walze W mit einem Stanniolstreifen bekleidet ist und durch das Uhrwerk U in gleichmäßige Rotation versetzt wird, während Abb. 323 einen der neuesten und vollkommensten Edisonschen Phonographen zur Anschauung bringt. Die Stanniolbekleidung der Walze ist hier (seit 1888) ersetzt durch eine wachsähnliche Masse, deren genauere Zusammensetzung Geheimnis des Erfinders ist. Der Wachscylinder W wird durch einen im Kasten K befindlichen Elektromotor von bewunderungswürdig ruhigem und gleichmäßigem Gange in Umdrehung versetzt. Die Geschwindigkeit der Cylinderumdrehungen (125 in der Minute) bewirkt der Regulator G durch Ein- resp. Ausschalten von Widerständen. Der das Sprachrohr und die Membran tragende Arm A ruht auf

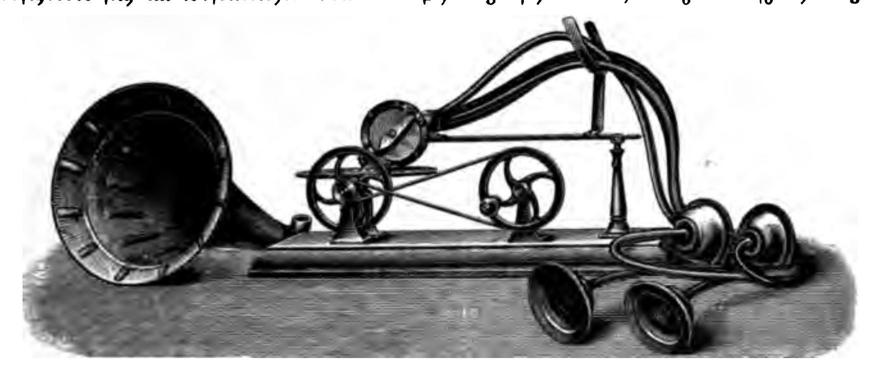
einem Schlitten; dieser wird längs der Führungsleiste F vorwärts bewegt durch ein Stück Muttergewinde M, welches auf der die Cylinderachse C bildenden feingängigen Hauptschraubenwelle aufliegt. Das Gewinde derselben, ein Meisterwerk der Feinmechanik, ist derart geschnitten, daß 100 Schraubengänge auf 1 englischen Zoll (25,4 mm) gehen. Die beiden Hebelarme A und B dienen zum Aufsetzen der Mutter auf die Hauptspindel, resp. zum Abheben derselben.



323. Neuester Edisonscher Phonograph.

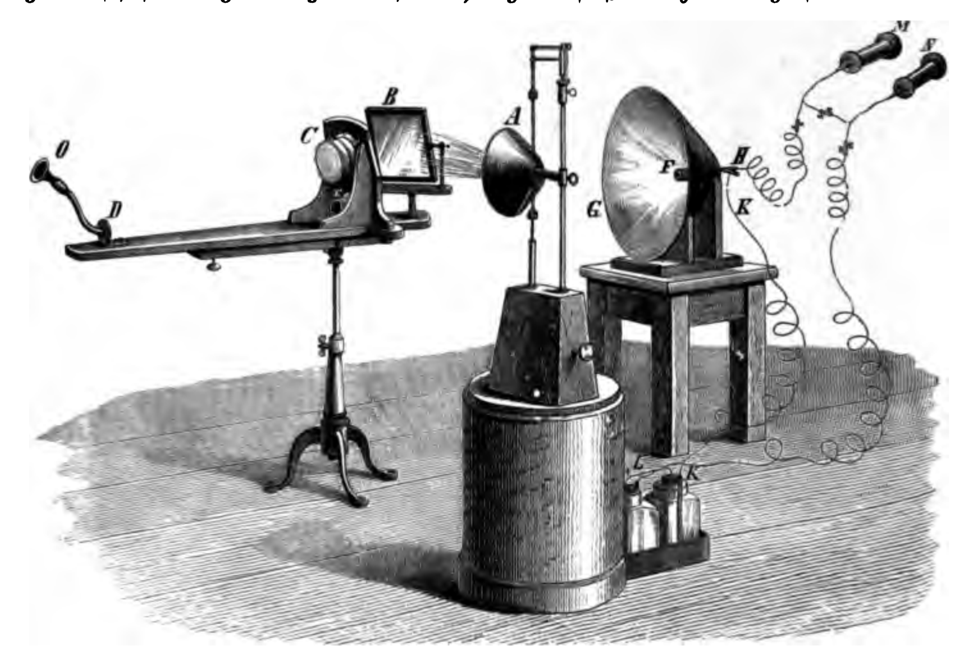
Die zum Phonographen gehörigen Membranen bestehen aus äußerst dünnen Glasplättchen, von denen die eine einen scharfen Stichel zum Eingraben der Membranschwingungen in den Wachscylinder trägt, die andere einen stumpfen Stichel für die Wiedergabe derselben. Eine dritte, etwas stärkere Membran ist mit einem kleinen, scharfen Stichel versehen, um unbrauchbar gewordene Wachscylinder von neuem abzudrehen und sie auf diese Weise zur Aufnahme neuer Tonstücke fähig zu machen. Wegen der genauen Beschreibung der einzelnen Details muß wieder auf die bereits erwähnte Stelle hingewiesen werden.

Eine Modifikation des Phonographen ist das Grammophon (Abb. 324). Es unterscheidet sich im wesentlichen von dem Phonographen durch die zur Aufzeichnung der


324. Grammophon.

Töne benutzte Ebonitplatte, die an Stelle des Wachscylinders im Phonographen tritt. Der Arm mit der Membran wird allmählich durch ein Gewinde radial weiter geführt, so daß der schreibende Stichel eine fortlaufende feingängige Spirale auf der Platte beschreibt. Die Ebonitplatte wird mit der Hand oder durch einen Elektromotor in Umdrehung versetzt.

Im Anschluß an den Phonographen möge endlich noch einer ingeniösen, allerdings praktisch noch nicht verwerteten Erfindung Erwähnung geschehen, die es ermöglicht, ohne Zuhilfenahme von elektrischen Leitungen, ausschließlich infolge von Bestrahlung, Töne in die Ferne zu senden. Der Apparat, der dies ermöglichen soll, ist von Graham Bell im Jahre 1880 erfunden und Photophon genannt worden. Folgendes ist das Prinzip seiner Einrichtung: Auf der Empfangsstation der in photophonischer Verbindung stehenden Stationen befindet sich ein Telephon, in welchem aber anstatt des Magnetkernes weiche Eisenstäbe stecken, und dessen Induktionsspirale in den Schließungskreis eines von einer Batterie ausgehenden permanenten Lokalstromes eingeschaltet ist. Ein Teil dieses Schließungskreises wird gebildet durch eine Zelle aus Selen, einem dem Schwefel ähnlichen Element, welches, wie zuerst May und Sale beobachtet und später W. G. Adams und besonders Werner Siemens durch eingehende Versuche bestätigt haben, die Eigentümlichkeit besitzt, daß sein galvanisches Leitungsvermögen durch Belichtung beeinflußt und zwar vergrößert wird. Mit



325. Photophon von Graham Bell.

dem Moment, wo Licht auf die Selenzelle trifft, ändert sich entsprechend dem Grade der Belichtung sein galvanischer Widerstand und infolgedessen die Stromstärke im Schließungskreise.

Licht kann man aber durch Spiegelvorrichtungen von der entfernten Station zur Empfangsstation senden und genau auf die Selenzelle richten. Gesetzt nun, daß an der Gebestation die Membran, gegen welche gesprochen wird, ein nach der Empfangsstation gerichteter Spiegel wäre, so würden dessen Erschütterungen hier abwechselnd Belichtungen des Selens bewirken, deren Dauer und Stärke von den erregenden Tonschwingungen abhängig wäre, und die durch die gleichartigen Stromänderungen vermittelst der Telephonmembran auf der Empfangsstation hörbar gemacht werden könnten.

Nach diesen Prinzipien hat Bell einen Apparat konstruiert, der in Abb. 325 dargestellt ist, und mit welchem auf eine Entfernung von 213 m photophonische Experimente mit Erfolg ausgeführt sein sollen; allein zu praktischer Bedeutung ist derselbe noch nicht gelangt. — Die rechte Seite der Abbildung stellt die Empfangsstation mit den beiden Telephonen M und N der Batterie K L und der im Brennpunkte des Hohlspiegels G befindlichen Selenzelle F dar. Diese wird von der Aufgabestation aus, welche die linke Seite der Abbildung darstellt, in folgender Weise belichtet: Von einem Helioſtaten oder einer

elektrischen Lampe A wird ein Lichtbündel auf den Spiegel B geworfen, von diesem reflektiert und durch das Linsensystem C auf die Membran D des Sprechtelephons O D konzentriert. Diese Membran, die aus einem sehr dünnen, versilberten Glasplättchen besteht, reflektiert die auf sie treffenden Lichtstrahlen, die durch die Linse E parallel gemacht werden, nach der Empfangsstation, wo sie von dem Hohlspiegel G auf die Selenzelle F konzentriert werden. Wird nun die Membran D durch Gegensprechen in Schwingungen versetzt, so treffen intermittierende Lichtstrahlen auf die Selenzelle und verursachen momentane Verstärkungen oder Abschwächungen des Lokalstromes KFHMNL. Durch letztere werden die Membranen der Telephone MN in hörbare, den Schwingungen der Membran D entsprechende Vibrationen versetzt.

Auf dem Prinzipe des Bellschen Photophons beruht auch das Radiophon oder Thermophon, mit dessen Konstruktion sich hauptsächlich E. Mercadier beschäftigt hat. Bei demselben kommen vorzugsweise die thermischen Eigenschaften der Strahlen zur Wirkung. Ein Strahlenbündel wird durch irgend einen Tongeber intermittierend gemacht. Zu diesem Zweck wird eine Glasscheibe mit schwarzem Papier beklebt, das konzentrisch mehrere Reihen von äquidistanten Löchern enthält. Je nach der Wahl der Löcherreihe auf welche man während der Drehung der Scheibe das Strahlenbündel auffallen läßt, erhält man bestimmte Intermittenzen, die mittels eines passenden Empfängers als Schall hörbar gemacht werden können. Als einen empfindlichen Empfänger eignet sich nach den Versuchen Mercadiers z. B. eine einseitig berußte, feine Glimmerscheibe, welche auf den unteren Rand eines Hörrohres befestigt wird. Es handelt sich bei diesem Vorgange um Wärmewirkungen der durch die Löcherreihe der rotierenden Scheibe unterbrochenen Strahlen. Die sehr schnell auf einander folgenden Erwärmungen des Empfängers erzeugen Schwingungen, deren Anzahl bedingt ist durch die Anzahl der Erwärmungen, so daß also die Tonhöhe ausschließlich von der Anzahl der Unterbrechungen der Wärmestrahlen abhängt.

Wenn auch diese Formen von Fernsprechapparaten eine praktische Verwertung bisher nicht gefunden haben, so sind sie doch zweifelsohne von hohem wissenschaftlichen Interesse.

Vom Lichte.

Wesen und Fortpflanzung des Lichts. Polarisation.

Ansichten der Alten über das Wesen des Lichts. Kepler. Cartesius. Huyghens. Newton. Die Undulations- und die Emanationstheorie. Fortpflanzung des Lichts. Messung der Geschwindigkeit durch die Verfinsterung der Jupitertrabanten von Cassini und von Römer. Aberration. Bradley. Fizeaus Methode. Polarisiertes und gewöhnliches Licht. Nörrenbergs Polarisationsapparat. Praktische Anwendung der Polarisation in der Technik. Mikrogeologie. Saccharimetrie.

Licht und Wärme — die Geschenke, durch welche die Sonne Leben gibt, fördert und bildet — sind die Grundbedingungen alles organischen Seins, und wenn die Wärme die Kraft bedeutet, so bedeutet das Licht die Herrlichkeit, den Geist und den Verstand. Die Nahrung gibt unserm Körper Wärme, unseren Muskeln Spannung, aber wir blieben hilflose Geschöpfe, wenn wir kein Organ für das Licht besäßen, keine Fähigkeit, Bilder von der Außenwelt in uns aufzunehmen. Das Auge bereichert uns mit Erfahrungen, die wir mit keinem unsrer übrigen Sinne machen können. Darum setzt jede Sprache Licht und Klarheit, Weisheit und Erleuchtung als engverwandte Begriffe neben einander. Wenn nun auch viele durch das Licht bedingte natürliche Erscheinungen einerseits und manche auf ihnen beruhenden Anwendungen zu wissenschaftlichen und praktischen Zwecken andererseits längst bekannt waren, so ist man doch erst in neuerer Zeit zu klaren und befriedigenden Vorstellungen über die wahre Natur des Lichtes gelangt.

Schon das frühe Altertum hat vom Wesen des Lichtes sich seine eigenen Begriffe zu machen gesucht. Allein die Philosophen gingen auf falschen Pfaden. Analog den übrigen körperlichen Empfindungen dachte man sich das Sehen als eine Art Tastempfindung. Feine Fühler gehen gewissermaßen, so nahm man an, vom Auge aus und empfangen dort, wo sie auf entgegenstehende Körper treffen, Eindrücke. Die Lichtbewegung sollte also, wie noch in dem Euklid zugeschriebenen Werk über die Optik ausgesprochen wird, nicht von dem

gesehenen Körper, sondern vom Auge aus stattfinden. „Die Gestalt unsrer Augen", heißt es in einem Werke des Heliodor von Larissa, „welche nicht hohl, noch so wie die anderen Sinne eingerichtet sind, beweist, daß das Licht aus ihnen ausströmt." Wie eine empfangende Hand, meinte man, müßte das Auge geformt sein, wenn es etwas von außen kommendes aufnehmen sollte; und da dies nicht der Fall wäre, da ferner die Augen sehr glänzend seien, und manche Menschen und Tiere selbst bei Nacht sollten sehen können, so gab man bereitwillig einer Ansicht Raum, die erst einer strengeren Untersuchung weichen mußte. Plato fühlte das Ungenügende dieser Theorie, er vermochte aber doch nicht sich vollständig von ihr loszusagen. Er ergänzte sie durch die Annahme, daß das Licht (die Ursache des Sehens) nicht bloß von den Augen, sondern ebenso auch von den gesehenen Körpern ausginge, und daß durch das Zusammenstoßen der beiden Strahlen die Empfindung des Sehens hervorgerufen würde.

Erst Aristoteles verwarf die langgehegte Anschauung, welche das Auge gewissermaßen mit einer Laterne verglich. Das Auge könne nicht so feuriger Natur sein, vielmehr müsse es im Innern wässerig und durchsichtig sein, weil der Sehnerv an der hinteren Wand liege; das Sehen werde durch Bewegungen eines durchsichtigen Mittels zwischen dem gesehenen Gegenstande und dem Auge bewirkt.

Diese Ansicht, welche wir als den Keim der späteren Theorieen über das Licht betrachten können, erhält durch Lucrez in anderer, bestimmter Weise Ausdruck:

> Also sag' ich, es senden die Oberflächen der Körper
> Dünne Figuren von sich, die Ebenbilder der Dinge;
> Häutchen möcht' ich sie nennen und gleichsam die Hüllen derselben;
> Denen entspringend sie dann die freien Lüfte durchströmen —

heißt es in dem Gedicht „De rerum natura", und wenn wir bei Aristoteles die ersten Anfänge der erst viel später zu vollständigem Siege gelangten Wellentheorie erkennen können, so scheinen uns diese Lucrezischen Verse einige Ähnlichkeit mit den Sätzen der bis dahin angenommenen Emanationstheorie auszudrücken.

Daß das Licht von den sichtbaren Körpern ausgehe, hatte sich im Mittelalter zur positiven Wahrheit unter den Philosophen erhoben (Optik Alhazens, eines gelehrten Arabers). Keiner aber von allen denen, die sich mit der Erörterung der auf die Lehre vom Licht bezüglichen Fragen beschäftigten, hat eine mathematische Behandlung des Gegenstandes versucht.

Der erste, welcher auf exaktem, strengem Wege sich an die Erklärung der optischen Erscheinungen wagte, war Kepler. Das Licht selbst hält er für nichts Körperliches. Er spricht sich zwar nicht mit Bestimmtheit über die Natur desselben aus, allein es hindert ihn dies nicht, die Abnahme der Intensität des Lichtes bei wachsender Entfernung des leuchtenden Körpers, ferner die physikalischen Erscheinungen der Brechung, der Spiegelung u. s. w. quantitativ zu bestimmen. Da er zeigte, daß diese Erscheinungen mechanischen Gesetzen unterworfen seien, und auch auf ganz selbständige Weise ihre Berechnung ausführen lehrte, so hat man die ersten wirklich nutzbaren Begriffe und Erfahrungen ihm zu danken. Das eigentliche Wesen des Lichtes blieb dabei ganz aus dem Spiele; wären aber die mechanischen Wissenschaften damals schon so ausgebildet gewesen, wie sie es heute sind, so würde Kepler und ebenso der nach ihm zunächst in der Geschichte der Optik folgende Cartesius mit Leichtigkeit diesem Teile der Physik einen Weg haben vorzeichnen können, auf welchem vielleicht ein langer und bis nahe in die Gegenwart reichender ununterbrochener Streit unter den Anhängern zweier Hypothesen umgangen worden wäre.

Zunächst waren es die merkwürdigen Erscheinungen der Lichtbrechung, welche die Frage nach der inneren Natur des Lichtes wieder in den Vordergrund stellten. Wir können hier auf eine detaillierte Untersuchung nicht eingehen und müssen uns begnügen, zu erwähnen, daß Cartesius durch die Phänomene der Spiegelung darauf geführt wurde, die Lichtstrahlen als materielle Körperchen anzusehen und sie mit einem geworfenen elastischen Balle zu vergleichen, der, unter einem bestimmten Winkel auf einen widerstehenden Körper aufschlagend, von demselben unter gleichem Winkel wieder abspringt. Dieser Vergleich würde, um auch für die Erklärung der Brechungserscheinungen zugelassen zu werden, voraussetzen, daß sich das Licht in einem dichteren Körper (Glas, Wasser)

rascher bewegt als in einem dünneren (Luft). Fermat bestritt dies mit der Behauptung, daß dichtere Mittel der Bewegung des Lichts einen größeren Widerstand entgegensetzen müßten als dünnere. Diese Zeitepoche der wissenschaftlichen Entwickelung ist deshalb von besonderer Wichtigkeit, weil jetzt zum erstenmal die Kardinalfrage nach der Geschwindigkeit des Lichtes eine bestimmte Fassung erhielt. War die Geschwindigkeit in dichteren Mitteln wirklich eine größere als in dünneren, so ließen sich die Erscheinungen der Brechung mit der Annahme kleiner, von dem leuchtenden Körper ausgeschleuderter Lichtkügelchen erklären (Emanations- oder Emissionstheorie); wurde die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes dagegen kleiner beim Übergang aus einem dünneren in ein dichteres Medium, so war diese Hypothese unzulässig, und es mußte nach einer anderen Erklärung gesucht werden.

Sehr bald nach Cartesius trat Hooke auf (1665) und lehrte, das Licht bestehe in Schwingungsbewegungen; aber erst Huyghens (1690) schuf aus diesem Gedanken eine vollständige Theorie, welche auch von dem berühmten Mathematiker Euler angenommen und verteidigt wurde.

Es dürfte wohl kaum unter unseren Lesern einen geben, welcher die Aufwendung großer Mühe und die Anstrengungen der bedeutendsten Geister zur Lösung so sublimer Fragen, wie der eben ausgesprochenen, als überflüssig und spitzfindig ansehen möchte. Aber selbst derjenige, der den hohen Stand unserer heutigen Kultur in seinem Umfange begreift und mit beglückendem Stolze sich als den Sohn einer Zeit fühlt, die in jeglicher Art des Reichtums weit über allen Zeiten der Vergangenheit steht, richtet den Blick der Dankbarkeit gewöhnlich nicht weit genug zurück und fängt gern da an zu vergessen, wo ihm der Nutzen für das praktische Leben nicht mehr so ohne weiteres in die Augen springt; — darum dieser Rückblick auf die entlegenen Vorstufen einer Wissenschaft, welche eine für die Menschheit so wichtige Disziplin umfaßt. Die große Menge freut sich zwar der Früchte, sie vergißt aber gar zu häufig derer, welche die Bäume pflanzten.

Wenn wir einen Stein in den ruhigen Spiegel eines Teiches werfen, so sehen wir, wie im Abschnitt „Vom Schall" auseinandergesetzt worden ist, von dem getroffenen Punkte aus gleichmäßige Wellenringe nach allen Seiten hin fortschreiten, bis sie, mit der größeren Entfernung immer schwächer werdend, endlich verschwinden. Wie der eine Ring nach außen hin sich fortbewegt, folgt ihm ein zweiter, und in regelmäßiger Abwechselung sehen wir dieselben Punkte des Wasserspiegels sich zu kleinen Bergen erheben oder als kleine Thäler hinabsenken. Das Wasser selbst geht dabei nicht wesentlich vorwärts, seine Teilchen kehren — das können wir beobachten, wenn wir ein kleines Stückchen Holz auf dem Wasser schwimmen lassen — immer wieder an ihre frühere Stelle zurück; sie machen bloß auf- und niedergehende oder kreisförmig oder elliptisch in sich zurückkehrende Bewegungen, die ganz den Schwingungen eines Pendels zu vergleichen sind. Alle diese Schwingungen und Ausweichungen ergeben als Summe die Welle. Dieselbe verschwindet, wenn endlich die kleinen Wasserteilchen infolge der unausgesetzt wirkenden Reibung allmählich die ihnen durch den Wurf des Steines mitgeteilte Bewegung verloren haben.

Die Welle selbst ist sonach nichts Körperliches, sie ist nur ein Bewegungszustand. Sie pflanzt sich in gerader Richtung fort, wenngleich ihre Form die eines Kreises oder strenger genommen die einer Kugeloberfläche ist; denn die wellenförmige Bewegung geht, wenn wir sie auch mit dem Auge nicht beobachten können, auch auf die über dem Wasser liegende Luft über und in die Wassermasse nach unten. In der letzteren freilich muß sie des großen Widerstandes wegen bald ersterben, in der ersteren wird sie für unsere Sinne unmerkbar. Die Wasserwelle selbst aber können wir sowohl sehen wie fühlen. Wer jemals am Strande gelegen und sich von der salzigen Flut bespülen ließ, weiß dies am besten. Luftwellen, welche in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft bestehen, werden für uns erst merkbar, wenn sie einander mit großer und regelmäßiger Geschwindigkeit folgen; sie erregen alsdann das Trommelfell unseres Ohres und bringen, indem sie auf unseren Gehörnerv übertragen werden und ihn erregen, in uns die Wahrnehmung eines Schalles oder eines Tones hervor.

Wie die Ursache des Schalles nun nichts als eine unseren Hörnerv erregende Bewegung ist, so, sagt Huyghens, ist auch die Ursache der Lichtempfindung, schlechtweg

das Licht selbst, nichts anderes, als die Wellenbewegung einer besonderen, überaus feinen, durch das ganze Weltall verbreiteten, elastischen Substanz (Lichtäther), die für uns nicht fühlbar ist, weil sie so fein sein muß, daß ihre Teilchen noch zwischen den Atomen der durchsichtigen Körper, wie Glas und Diamant, sich bewegen und die Träger der Lichtwellen sein können.*) Gelangen diese Lichtwellen, welche nach den Gesetzen der Wellenbewegung sich fortpflanzen, durch unser Auge hindurch zu unserem Sehnerv, so bewirken sie die Empfindung, die wir „Sehen“ nennen, wie die Luftwellen die Empfindung des „Hörens“ hervorrufen.

In einem nach allen Richtungen gleichmäßig elastischen, „isotropen“ Medium werden die Lichtwellen vom leuchtenden Punkte aus, den wir uns in vibrierender Bewegung vorstellen müssen, nach allen Seiten hin gleichmäßig fortschreiten, und die Hauptwelle wird die Oberfläche einer um den leuchtenden Punkt gelegten Kugel darstellen. Sind aber nach gewissen Richtungen hin die Elastizitätsverhältnisse des Mediums ungleich, so wird die Wellenoberfläche ihre Kugelform verlieren und dafür eine andere, je nach den Umständen veränderte Gestalt annehmen. Dies geschieht in Krystallen, die nicht zum regulären Systeme gehören, und die daran beobachteten sehr mannigfachen Erscheinungen sind für die Huyghenssche Theorie eine wesentliche Stütze geworden.

Es ist wunderbar, daß sich Newton dieser Theorie, welche nach unseren heutigen Betrachtungen so einfach ist und, wie wir im Verlaufe späterer Betrachtungen noch sehen werden, die sämtlichen Erscheinungen auf ungezwungenste Weise erklären läßt, nicht anschloß. Die Ursache ist vielleicht in dem Umstande zu suchen, daß Newton in seinen Vorstellungen über die Natur des Lichtes einerseits durch die Erscheinungen des Stoßes elastischer Körper, andererseits durch das von ihm entdeckte, berühmte Gravitationsgesetz beeinflußt wurde. Newton ist als der bedeutendste Vertreter der Emanationstheorie zu betrachten. Nach derselben besteht das Licht aus unmeßbar kleinen elastischen Teilchen, die von den leuchtenden Körpern mit sehr großer Geschwindigkeit fortgeschossen werden. Wenn diese Teilchen auf glatte Oberflächen treffen, so werden sie nach dem Gesetze des Stoßes elastischer Körper reflektiert. Der gewaltigen Autorität Newtons ist es zuzuschreiben, daß die Emanationstheorie nicht nur zu jener Zeit über die Wellentheorie zur Herrschaft gelangte, sondern auch noch in neuerer Zeit von Physikern wie Biot und Brewster vertreten wurde.

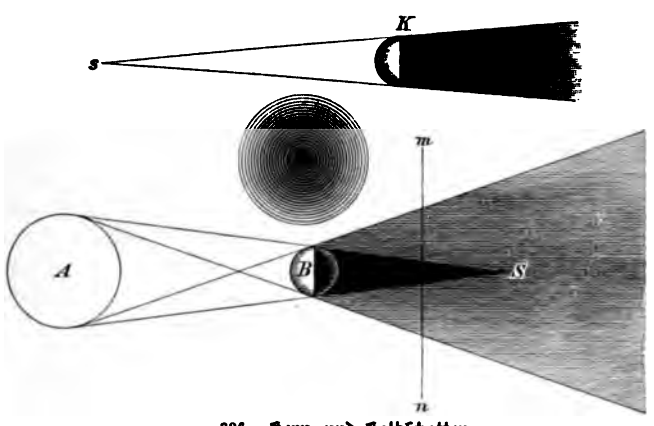
Heute gilt ausschließlich in der Physik die Wellentheorie, der zufolge das Licht aus Schwingungen besteht, wie es Huyghens gelehrt hat. Durch Young, Fresnel, Cauchy, Malus, Arago und andere ist dies sowohl durch mathematische Entwickelung, als auch auf experimentellem Wege überzeugend dargethan und so der Zusammenhang und die Möglichkeit der Umwandlung der physikalischen Kräfte, welche in der Neuzeit in dem Gesetz von der Wechselwirkung der Naturkräfte ihren Ausdruck findet, erwiesen worden. Die physiologischen Erscheinungen des Lichtes, deren Gesetze durch Helmholtz eine erschöpfende Untersuchung erfahren haben, stehen mit der Hypothese von der Wellennatur des Lichtes durchaus im Einklang.

Fortpflanzung des Lichts. Es läßt sich leicht beobachten, daß sich das Licht in gerader Richtung und nach allen Seiten hin fortpflanzt; man braucht nur in die gerade Linie zwischen das Auge und den leuchtenden Punkt einen undurchsichtigen Körper zu bringen und augenblicklich wird der Lichteindruck verschwinden; das Auge befindet sich im Schatten. Wenn ein undurchsichtiger Körper K von einem einzigen leuchtenden Punkte s bestrahlt wird, so wird die Gesamtheit der von dem lichtgebenden Punkte ausgehenden, die äußerste Umgrenzung des undurchsichtigen Körpers streifenden geraden Linien eine Kegeloberfläche bilden; der jenseit des dunkeln Körpers liegende Teil derselben bildet die Grenze des Schattens (Abb. 326). Ist dagegen die Lichtquelle nicht ein Punkt, sondern ein leuchtender Körper A (Abb. 326), so gehen von jedem Punkte desselben Lichtstrahlen nach allen Richtungen aus, und jeder dieser unzähligen leuchtenden Punkte bildet hinter dem undurchsichtigen beleuchteten Körper seinen besonderen Schattenkegel. Da aber, wie die Abbildung zeigt, diese Schattenkegel teilweise von anderen Punkten der Lichtquelle erhellt werden, so grenzt sich von dem ganz lichtlosen Schatten, dem Kernschatten, ein

*) Nach William Thomson (Lord Kelvin) wiegt eine Kubikmeile des Lichtäthers etwa 0,5 Milligramm und 1 Kubikmeter 0,0000000000012 Milligramm.

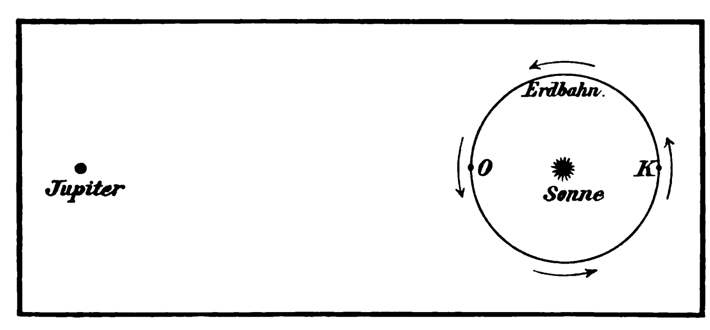
diesen umhüllender Mantel ab, welcher nach innen mehr, nach außen weniger beleuchtet ist und Halbschatten genannt wird .In der Nähe des schattengebenden Körpers ist der Kernschatten nur von einem schmalen Halbschatten umgeben und deshalb ziemlich scharf begrenzt, mit wachsender Entfernung wird der Übergang unbestimmter. Deshalb erscheint der Schatten eines vom Sonnenlichte beleuchteten Körpers, z. B. der einer Nadel, wenn man ihn dicht hinter der Nadel mittels eines Papierschirmes auffängt, scharf begrenzt, in größerer Entfernung aber ist ein Schatten nicht mehr wahrzunehmen.

Daß das Licht zum Durchlaufen seines Weges Zeit braucht, kann ebenso aus der Undulationstheorie, wie aus der Emissionstheorie gefolgert werden und es ist von großer Wichtigkeit, Mittel und Wege zu finden, die Geschwindigkeit des Lichtes in verschieden dichten Körpern genau zu bestimmen. Von allen irdischen Bewegungen ist keine im stande, uns eine Idee von der Größe dieser Geschwindigkeit zu geben. Zu so außerordentlichem Zwecke werden daher auch ganz außerordentliche Meßmethoden angewandt werden müssen, von denen wir die wichtigsten unseren Lesern zum Verständnis zu bringen suchen wollen.



326. Kern- und Halbschatten.

Messung der Geschwindigkeit des Lichts. Es wird gewöhnlich angenommen, daß Olaf Römer, ein dänischer Astronom, zuerst (1675) aus den Beobachtungen der Verfinsterung der Jupiterstrabanten diese Aufgabe im allgemeinen gelöst habe. Der Jupiter ist von vier Monden umgeben. Der erste derselben hat eine Umlaufszeit von 42 Stunden 28 Minuten 36 Sekunden, und seine Bahn liegt mit der seines Planeten in einer Ebene, so daß er bei jedem Umlaufe einmal in den Schatten desselben eintreten und eine Verfinsterung erleiden muß. Römer beobachtete das Eintreten des Trabanten in den Schatten des Jupiter und ebenso das Austreten aus demselben, d. h. er beobachtete das Verschwinden und das Wiederaufleuchten des Trabanten und fand, daß das Zeitintervall zwischen dem Eintritt zweier auf einander folgenden Verfinsterungen und ebenso das Zeitintervall zwischen zwei auf einander folgenden Aufleuchtungsmomenten nicht dasselbe war. Wenn die Erde sich auf den Jupiter zu bewegt (Abb. 327), sind diese Zeitintervalle kleiner, als wenn sie sich von ihm entfernt, es verzögern sich scheinbar mit der Entfernung die Eintritte der Verfinsterungen, und zwar beobachtete Römer, daß diese Verzögerung, je nachdem die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne sich an der dem Jupiter zunächst gelegenen Stelle O (Opposition), oder an der entgegengesetzten Seite K (Konjunktion) ihrer Bahn befand, ungefähr 16,6 Minuten betrug. Die Punkte O und K sind aber um den Durchmesser der Erdbahn, welcher nach Encke 41 393 520 Meilen beträgt, von einander entfernt.



327. Römers Methode zur Messung der Lichtgeschwindigkeit.

Über dies Phänomen teilte, wie Montucla nachgewiesen hat, Dominic Cassini zuerst am 12. August 1675 den Astronomen eine neue Ansicht mit, nach welcher die Veränderung der Verfinsterung daher rühren sollte, daß das Licht Zeit nötig habe, um von den Trabanten des Jupiter bis zu uns zu gelangen; da die Erde bei der Hinbewegung sich dem Jupiter in $42^1/_2$ Stunden um 590000 Meilen genähert habe, so hätten die Lichtstrahlen auch diesen Weg weniger zurückzulegen. Bei der Entfernung der Erde müßten sie einen um 590000 Meilen weiteren Weg zurücklegen, um die Erde zu treffen, und könnten diese also auch erst entsprechend später einholen. Damit hatte Cassini das Richtige getroffen. Die damaligen Messungen waren jedoch noch zu ungenau, und die daraus hervorgehende mangelhafte Übereinstimmung der Resultate veranlaßte Cassini, seine Idee später selbst wieder aufzugeben. Römer jedoch, der von Picard nach Paris berufen worden war, fand an dem Cassinischen Schlusse vielen Reiz, und es gelang ihm durch eine große Zahl von Beobachtungen, diese Theorie auch gegen die Einwendungen, die später sowohl Cassini selbst als auch seine Anhänger erhoben, mit der überzeugendsten Klarheit zu verteidigen. Wenn ihm demzufolge zwar nicht die Ehre der Priorität zuerkannt werden kann, so darf doch die Wissenschaft seine durchgreifende Beweisführung mit nicht geringeren Ruhme ehren, als die erste von ihrem eigenen Urheber wieder verlassene Idee.

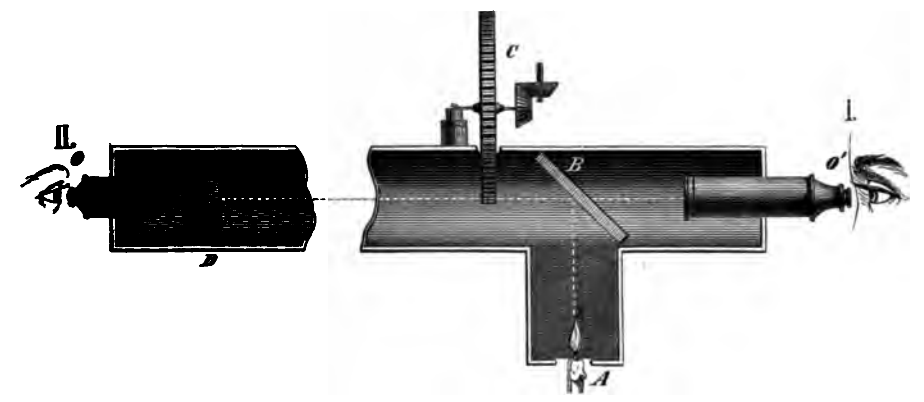
Wenn das Licht, wie Römer fand, 16,5 Minuten braucht, um den Durchmesser der Erdbahn und 14 Sekunden um 590000 Meilen zu durchlaufen, so muß es in einer Sekunde nahezu 42000 Meilen zurücklegen.

Eine Bestätigung der Römerschen Messung gab 50 Jahre später (1729) der englische Astronom Bradley durch die Entdeckung der kleinen, scheinbaren jährlichen Bewegungen, welche die Fixsterne zeigen (Aberration des Lichtes). Die Erscheinung der Aberration läßt sich folgendermaßen veranschaulichen. Nehmen wir an, wir befänden uns auf einem Schiffe, welches sich mit großer Geschwindigkeit in einer bestimmten Richtung auf einem Flusse fortbewegt, und es würde vom Ufer aus einer Kanone eine Kugel senkrecht gegen die Schiffsrichtung auf das Schiff abgeschossen. Befände sich das Schiff in Ruhe, so würde die Linie, welche die durch die Kugel bewirkten Durchbohrungen der vorderen und der gegenüberliegenden Schiffswand verbindet, senkrecht zur Längsrichtung des Schiffes gehen; bewegt sich aber das Schiff, so wird der Schußkanal schräg gegen die Längsrichtung liegen und zwar um so schräger, je schneller die Bewegung erfolgt; ein in der Richtung des Schußkanals blickender Beobachter wird daher den Standpunkt der Kanone nach der Richtung hin verschoben annehmen, in welcher das Schiff sich bewegt. Kennt man nun die Geschwindigkeit, mit welcher das Schiff sich bewegt, und jene Neigung der Schußrichtung, so kann man die Geschwindigkeit der Kugel berechnen. In genau derselben Weise erscheinen die Lichtstrahlen eines vertikal über uns befindlichen Fixsternes infolge der Bewegung der Erde schräg zu uns zu gelangen. Die Stelle des Schiffes vertritt die Erde, diejenige des Schußkanals das Fernrohr des Beobachters. Da wir die Geschwindigkeit der Bewegung der Erde kennen und die durch sie bewirkte Neigung der Lichtstrahlen beobachten, so können wir die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts berechnen. In der That fand Bradley nach dieser Methode die Größe derselben genau übereinstimmend mit der von Römer gefundenen.

Am genauesten aber und durch ein auf das scharfsinnigste ausgedachtes Meßverfahren hat (1849) der französische Physiker Fizeau und nach ihm Foucault die Geschwindigkeit des Lichtes direkt bestimmt. Denken wir uns die vier Flügel 1, 2, 3, 4 einer in Gang befindlichen Windmühle genau so breit wie die dazwischen liegenden leeren Räume, und nehmen wir an, daß die Welle, an welcher die Flügel befestigt sind, zu einem vollen Umgange gerade 8 Sekunden braucht, so wird eine gewisse Richtung zwischen den Flügeln hindurch alle Sekunden viermal abwechselnd frei und viermal wieder geschlossen sein. In dieser Richtung nun soll ein Gummiball zwischen den Flügeln 1 und 2 hindurch gegen eine dahinter befindliche, zu jener Richtung senkrechte Wand geworfen werden. Steht die Mühle still, so kommt der Ball zwischen denselben Flügeln 1 und 2 wieder zurück; bewegt sie sich aber, so wird während seines Hin- und Herganges die Stellung der Flügel sich geändert haben und der Ball nicht mehr an derselben Stelle zwischen ihnen zurückkommen. Wenn er bis an die Wand gerade eine halbe Sekunde Zeit braucht,

und ebensoviel wieder zurück, so hat die Welle während der Zeit, in welcher er hin und her flog, genau $^1/_8$ Umdrehung durchlaufen, und der Ball trifft auf seinem Rückwege anstatt des offenen Zwischenraumes den festen Flügel 2, der ihn aufhält. Ist dagegen die Geschwindigkeit des Balles nur halb so groß, so daß er also zum Durchlaufen seines ganzen Weges 2 Sekunden braucht, so kann er auf seinem Rückwege wieder frei hindurchfliegen, allein diesmal nicht zwischen den Flügeln 1 und 2, sondern zwischen 2 und 3. Auf diese Weise wird man, wenn die Umdrehungsgeschwindigkeit der Flügel und die Entfernung der Wand von denselben genau bekannt ist, die Geschwindigkeit des Balles zu berechnen vermögen je nach dem Teile des Kreisumfanges, um welchen während seines Hin- und Herganges die Welle sich gedreht hat.

Auf ganz demselben Prinzipe beruht der Fizeausche Apparat; nur ist derselbe, der Natur der Sache gemäß, mit außerordentlicher Feinheit konstruiert. Die Abb. 328 wird ihn in seinen Grundzügen veranschaulichen. Die ganze Vorrichtung besteht aus zwei Hälften I und II, welche in etwa $7^1/_2$ km Entfernung von einander aufgestellt sind. Die röhrenförmigen Hälften werden durch astronomische Fernrohre O und O' genau auf einander gerichtet, so daß deren Achsen in eine und dieselbe gerade Linie fallen. Die Beobachtungsstation befindet sich bei I. A ist die Lichtquelle, die eine große Leuchtkraft



328. Fizeaus Methode zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes.

besitzen muß, B eine unter 45° geneigte, fein polierte, ebene Glasplatte, C ein Rad, das an seinem Umfange eine große Zahl gleichweit von einander abstehender Einschnitte besitzt, die in ihrer tiefsten Lage gerade in der Mittellinie des Apparates liegen. Diese Einschnitte sind genau so breit wie die dazwischen stehenden Zähne. Das Rad läßt sich sehr rasch um seine Achse drehen; die Zahl der Umdrehungen und die Geschwindigkeit wird durch ein Uhrwerk fortwährend gezählt und kontrolliert. Auf der anderen Station ist ein Spiegel D so aufgestellt, daß er die von der Glasplatte B nach ihm reflektierten Lichtstrahlen in derselben Richtung nach I wieder zurückwirft.

Die Strahlen, welche von der Lichtquelle ausgehen, werden nun zum Teil von der Glasplatte B in der Richtung nach II gespiegelt, zum Teil werden sie von der durchsichtigen Glasplatte durchgelassen. Diejenigen Strahlen aber, welche nach II zu reflektiert worden sind, werden hier von dem Spiegel D wieder zurückgeworfen und gehen teilweise durch die Platte B, so daß unter Umständen der Beschauer in O' das vom Spiegel D zurückgeworfene Bild der Lichtquelle A sehen kann. Wenn das Rad C ruhig steht, und die Strahlen gerade zwischen zwei Zähnen hindurchgehen, so erscheint dieses Bild als ein leuchtender Punkt; wird aber das Rad gedreht, so wird das Licht in lauter einzelne Partieen zerschnitten, die um so rascher auf einander folgen, je rascher sich das Rad dreht.

Jedes dieser Lichtbüschel durchläuft seinen Weg zum Spiegel hin und zurück zum Beschauer, wie jener Gummiball, den wir durch die Windmühlenflügel warfen. Es wird auch ebenso aufgehalten, wenn sich während seines Weges ein Zahn des Rades in seine Richtung geschoben hat. Kommt der Zahn bloß zum Teil dazwischen, so wird von jedem

Lichtbüschel auch nur ein Teil vernichtet; das Spiegelbild in D erscheint dem Beschauer schwächer leuchtend. Wenn aber die Geschwindigkeit des Rades so groß ist, daß gerade in derselben Zeit, in welcher der Strahl hin und zurück läuft, ein ganzer Zahn an die Stelle kommt, wo vorher ein Einschnitt war, so wird alles Licht von D aus auf die Rückseite der Zähne fallen, und durch die Einschnitte empfängt der Beobachter immer nur die Schatten, welche die Zähne bei ihrem Durchqueren des Lichtstrahls nach D werfen. Das Bild in D verschwindet dann vollständig, es wird dunkel. Die Geschwindigkeit des Rades in diesem Falle werde 1 genannt. Dreht man das Rad noch rascher, so gelangt ein Teil des zurückkommenden Lichtes durch den nächsten Einschnitt; wenn die Umdrehung mit der Geschwindigkeit 2 stattfindet, entsteht wieder ein Maximum der Helligkeit; denn alle Lichtpartien, die durch den einen Zwischenraum hindurch zum Spiegel laufen, gelangen von da durch den nächsten Zwischenraum zurück in das Auge des Beobachters. Bei der Geschwindigkeit 3 ist es wieder ganz dunkel, bei 4 wieder am hellsten u. s. w.

Das Zahnrad, welches Fizeau anwandte, hatte 720 Zähne, jeder Zahn und jeder Einschnitt betrug also $^1/_{1440}$ des Kreisumfanges; die Entfernung des Spiegels vom Beobachtungsfernrohre betrug abgerundet 1,15 Meilen. Bei 12,6 Umdrehungen in der Sekunde erfolgte die erste Verfinsterung; bei 25,2 Umdrehungen war wieder vollständige Helligkeit u. s. w. Daraus ergibt sich, daß das Licht nahezu $^1/_{18000}$ Sekunde braucht, um 2,3 Meilen Weg zurückzulegen, und daß es also in der Luft mit einer Geschwindigkeit von nahezu 42 000 Meilen in der Sekunde sich fortpflanzt. In Wasser, Glas und anderen dichten Medien zeigte sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes geringer, und mit dieser neuen Bestätigung entzog die Huyghenssche Wellentheorie der Emanationshypothese die hauptsächlichste Stütze.

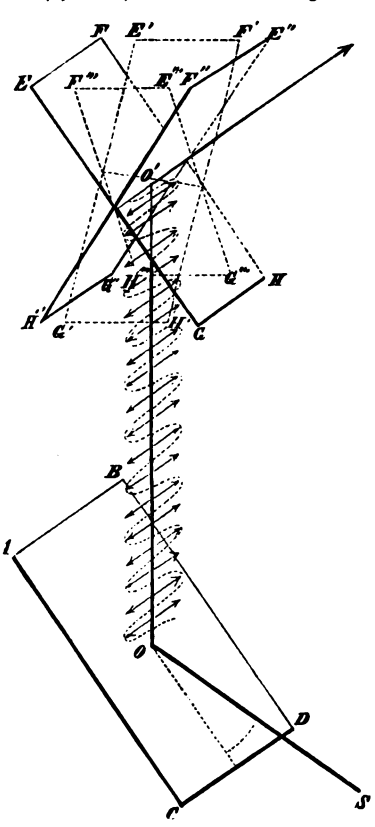
Um von der Sonne bis zur Erde zu gelangen, braucht das Licht gegen acht Minuten, von einzelnen Fixsternen mehrere Jahre, und wenn wir den gestirnten Himmel betrachten, so sehen wir ihn nicht, wie er in diesem Augenblicke wirklich ist, sondern wie er war, vor kürzerer oder längerer Zeit, je nachdem die betrachteten Welten uns näher oder entfernter sind. Ein Stern könnte plötzlich verschwinden, und noch Jahre lang würden wir seine Strahlen bemerken; sein Licht durchzittert noch den unendlichen Raum und erhält sein Bild am Firmament, bis die zuletzt ausgesandte Welle ihre Schwingungen vollbracht hat.

Polarisiertes Licht. Wie wir gesehen haben, besteht das Licht in einer Wellenbewegung, und zwar erfolgen die Schwingungen der Lichtätherteilchen transversal, d. h. senkrecht zur Richtung der Fortpflanzung. Im gewöhnlichen Licht, welches nach allen Seiten dieselben Eigenschaften zeigt, denken wir uns die Lichtätherteilchen nach allen möglichen, zur Fortpflanzungsrichtung senkrechten Richtungen schwingend. Erfolgen die Schwingungen der Ätherteilchen sämtlich in einer und derselben Ebene oder in parallelen Ebenen, wie etwa die Teilchen eines gespannten Seiles, auf dessen Ende man einen Schlag geführt hat, immer in derselben Ebene rechtwinkelig zur Längsrichtung bald nach der einen, bald nach der entgegengesetzten Richtung ausweichen, so nennt man das Licht polarisiertes Licht. Die Bezeichnung rührt daher, daß Newton die Erscheinungen, welche das Licht bei seinem Durchgange durch doppeltbrechende Medien zeigt, in eine gewisse Analogie mit den polaren Eigenschaften eines Magnets gebracht hatte.

Das Licht, wie es in der Natur entsteht, sei es durch den chemischen Prozeß der Verbrennung oder durch Reibung oder aus Elektrizität u. s. w., ebenso dasjenige, welches uns von der Sonne und den Fixsternen zugestrahlt wird, ist gewöhnliches Licht; in ihm schwingen die Ätherteilchen nach allen möglichen Richtungen. Man kann aber aus diesem Lichtgewirr das in einer und derselben Ebene schwingende ausscheiden oder die Schwingungsebenen parallel machen; dies Verfahren nennt man die Polarisation des Lichtes und die dazu dienenden Apparate Polarisationsapparate. Schon Erasmus Bartholinus hatte im Jahre 1669 gesehen, daß das Licht, wenn es durch gewisse Kalkspatkrystalle (isländischen Doppelspat) geht, in zwei Strahlenbündel geteilt wird, deren Eigenschaften von dem gewöhnlichen Lichte verschieden sind. Er hatte auch beobachtet, daß bisweilen diese Zerlegung nicht stattfindet, und Huyghens hatte die Verhältnisse festgestellt, unter welchen dies geschieht, und die Erscheinungen aus der Wellentheorie erklärt. Aber

erst als **Malus** 1809 in Paris zufällig bemerkte, daß Sonnenstrahlen, die von gegenüberliegenden Fensterscheiben zurückgeworfen waren, ganz ebenso sich verhielten, wie jenes durch Kalkspat gegangene Licht, wurde die Erscheinung genauer untersucht und von Malus das Gesetz dieser Erscheinung, der Polarisation, entdeckt.

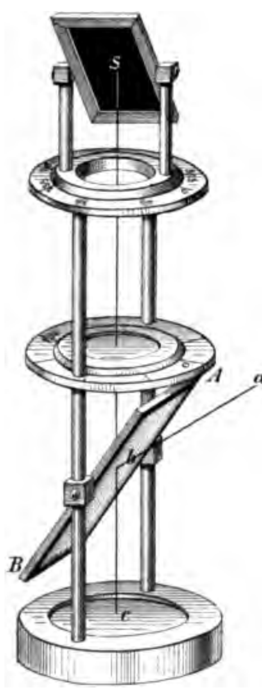
Nörrenberg hat, um dieselbe auf einfache Weise nachzuweisen, einen Apparat konstruiert, der sich auf das in Abb. 329 versinnlichte Prinzip stützt. Dieselben Erscheinungen der Polarisation, wie bei den durch einen doppeltbrechenden Krystall gehenden Lichtstrahlen, kann man nämlich auch bei demjenigen Lichte beobachten, welches unter gewissen Winkeln von durchsichtigen Körpern zurückgeworfen wird. Für verschiedene Körper ist dieser Winkel — der **Polarisationswinkel** — verschieden, bei Glas beträgt er etwa 35,5 Grad. Ist ABCD eine durchsichtige Glasplatte, auf welche das Lichtstrahlenbündel SO unter einem Winkel von 35,5 Grad auffällt, so geht ein Teil des Lichtes durch das Glas hindurch, der andere wird unter demselben Winkel (vergl. das folgende Kapitel) reflektiert und geht in der Richtung OO' weiter. Diese reflektierten Lichtstrahlen zeigen jenen Parallelismus der Schwingungsebenen, welchen wir als die charakteristische Eigenschaft polarisierten Lichtes ansehen müssen. Die Schwingungsebene und die Art der Bewegung in ihr ist in der Abbildung durch die punktierte Wellenlinie und die zwischengezeichneten kleinen Pfeile angedeutet. Die Ebene SOO' heißt die **Polarisationsebene**; sie steht auf der Schwingungsebene senkrecht. Lassen wir nun das polarisierte Licht auf einen zweiten Spiegel EFGH, der gegen die Lichtstrahlen OO' um denselben Winkel von 35,5 Grad geneigt ist, auffallen, so können wir seine besondere Beschaffenheit beobachten. Wenn dieser zweite Spiegel derart beweglich ist, daß er, während seine Neigung gegen die Lichtstrahlen OO' immer gleich bleibt, sich um die Richtung derselben als Achse im Kreise drehen und in die vier Hauptstellungen EFGH — E'F'G'H' — E''F''G''H'' und E'''F'''G'''H''' bringen läßt, so würde bei dieser Drehung keinerlei Veränderung des Spiegelbildes zu bemerken sein, wenn der von O nach O' kommende Strahl gewöhnliches Licht wäre. Das durch den unteren Spiegel polarisierte Licht dagegen verhält sich anders; denn es wird nur in den beiden, zur Schwingungsebene parallelen Lagen EFGH und E'''F'''G'''H''' vollständig zurückgeworfen, in allen dazwischenliegenden Stellungen aber mehr oder weniger und in den beiden rechtwinkelig gegen die Schwingungsebene stehenden Ebenen E'F'G'H' und E''F''G''H'' ganz und gar absorbiert. Dreht man also den oberen Spiegel wie den Zeiger einer Uhr aus seiner Stellung EFGH um den ganzen Kreis, so nimmt darin das Spiegelbild an Helligkeit immer mehr ab, bis es nach einer Viertelumdrehung ganz dunkel ist; von da ab wird es wieder heller und erreicht ein Maximum der Helligkeit nach einer Drehung um den halben Kreis; demnach gibt es zwei Punkte größter Helligkeit und zwei Punkte größter Dunkelheit.



329. Polarisation des Lichtes.

Der auf diesem Prinzipe beruhende **Nörrenbergsche Polarisationsapparat** ist in Abb. 330 dargestellt. Die Grundplatte des Apparates trägt einen horizontal liegenden, belegten Spiegel c, über welchem sich eine durchsichtige, um eine horizontale Achse drehbare Glasplatte AB befindet. Weiter nach oben befindet sich am Stative eine Blende, welche in einem geteilten Kreisringe gedreht werden kann, und am oberen Ende des

Statives endlich ein Ring, welcher mittels zweier Säulen einen auf seiner Rückseite geschwärzten Glasspiegel S trägt. Letzterer kann sowohl um eine horizontale Achse, als auch in dem Ringe um die vertikale Achse des Apparates gedreht werden. Die Polarisation des Lichtstrahles erzielt man nun auf folgende Weise: Man gibt dem Spiegel AB eine gegen die Vertikale um einen Winkel von 35,5 Grad geneigte Lage. Fallen bei dieser Stellung des Spiegels Lichtstrahlen unter einem Winkel von 35,5 Grad auf den Spiegel, so geht ein Teil derselben durch das Glas hindurch, ein anderer Teil wird in der Richtung bc vertikal nach unten reflektiert, und dieser Teil der Lichtstrahlen ist polarisiert. Die in der Richtung bc auf den Spiegel c fallenden polarisierten Lichtstrahlen werden nun in der Richtung cb reflektiert, gehen zum größten Teil zum zweitenmal durch den Polarisationsspiegel AB hindurch und gelangen nach dem oberen Teile des Apparates bis zu dem geschwärzten Glasspiegel S, der ebenfalls so eingestellt ist, daß seine Ebene mit der Vertikalen einen Winkel von 35,5 Grad bildet. Stehen beide Spiegel parallel, so reflektiert der obere Spiegel die von unten her ihn treffenden Strahlen, das Gesichtsfeld erscheint also einem in den Spiegel S schauenden Beobachter hell. Dreht man aber den Spiegel S bei unveränderter Neigung um die Achse des Instruments, so beobachtet man die vorhin angegebenen Veränderungen der Lichtintensität. Den unteren Spiegel AB nennt man den **Polarisator**, den Spiegel S den Zerlegungsspiegel oder **Analysator** des Polarisationsapparates.



330. Nörrenbergs Polarisationsapparat.

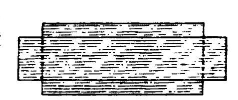
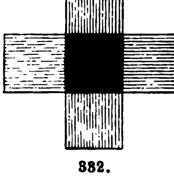
Arago, der sich neben **Fresnel** am eifrigsten mit der Untersuchung der Polarisation beschäftigt hat, machte 1811, nachdem die Polarisation durch Brechung und durch Spiegelung gefunden worden war, die Entdeckung, daß die polarisierten Lichtstrahlen beim Durchgange durch gewisse Körper unter Umständen besondere Eigenschaften annehmen. So läßt z. B. das großenteils polarisierte Licht, welches der blaue Himmel zurückstrahlt, ein dagegen gehaltenes Glimmer- oder ein Gipsblättchen für gewöhnlich ganz farblos erscheinen, während es prachtvoll gefärbt sich zeigt, wenn man zwischen dasselbe und das Auge noch ein doppeltbrechendes Prisma von Kalkspat (sogenanntes **Nicolsches** Prisma) bringt. Wie das Glimmer- und Gipsblättchen, so bringen alle doppeltbrechenden Körper, wenn man sie in polarisiertem Lichte durch ein Kalkspatprisma betrachtet, die glänzenden Erscheinungen der sogenannten **farbigen** oder **chromatischen Polarisation** hervor, und diese Eigenschaft ist ein sicheres Mittel, um doppeltbrechende Körper von einfachbrechenden zu unterscheiden.

Zur Erklärung aller dieser Eigenschaften legen wir dem den ganzen Raum erfüllenden und alle Körper durchdringenden Lichtäther bestimmte mechanische Eigenschaften bei und rechnen mit ihm wie mit einem Körper, der diese mechanischen Eigenschaften besitzt. Gleichwie in der Mechanik nach bestimmten Prinzipien die Zusammensetzung und Zerlegung von Kräften und von Bewegungen und die Zusammensetzung und Zerlegung von Schwingungen berechnet wird, so werden auch die Schwingungen des Lichtäthers nach mechanischen Gesetzen behandelt und aus der Zusammensetzung und Zerlegung dieser Schwingungen die Polarisationserscheinungen abgeleitet und erklärt. So ist die Wirkung der Spiegelebene bei der Polarisation des Lichtes nach dem Gesetz vom Parallelogramm der Kräfte zu beurteilen; jede der verschiedenen Schwingungen wird in zwei rechtwinkelig auf einander stehende zerlegt; die eine davon, welche rechtwinkelig zur Spiegelebene stattfindet, wird absorbiert, die andere, welche der Spiegelebene parallel vor sich geht, reflektiert. Das innere Gefüge gewisser Krystalle — wir haben schon des Kalkspates in dieser Beziehung Erwähnung gethan — zwingt auch die Lichtstrahlen, in zwei rechtwinkelig auf einander

stehenden Ebenen zu schwingen; das einfallende Licht wird in zwei Strahlenbündel gespalten, welche beide beim Heraustreten polarisiert sind.

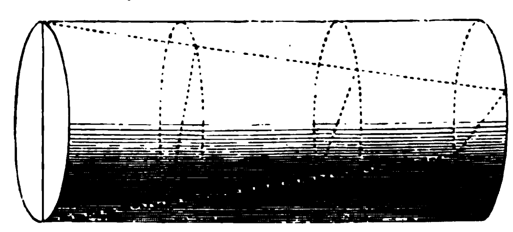
Ein Lichtstrahl, welcher auf eine parallel der Krystallachse geschliffene Turmalinplatte fällt, wird in zwei zu einander senkrechte polarisierte Strahlen zerlegt; die Schwingungen des einen erfolgen parallel zur Krystallachse, diejenigen des zweiten senkrecht dazu; letztere werden vom Turmalin stark absorbiert. Hält man daher eine zweite Turmalinplatte, deren Achse parallel der Achse der ersteren ist, vor diese, so wird das Licht durch beide hindurchgehen (Abb. 331). Hält man hingegen die zweite Platte so vor die erste, daß die Achsen gekreuzt sind (Abb. 332), so wird das von der einen Platte hindurchgelassene Licht von der zweiten absorbiert, so daß eine Auslöschung des Lichtes stattfindet.

Nicol hat den Kalkspatkrystall in eigentümlicher Weise zerschnitten und ein Prisma daraus geschliffen, welches nur den einen der beiden Strahlen gesondert hindurchgehen läßt. Ein solches Nicolsches Prisma ist, wenn es sich darum handelt, polarisiertes Licht zu erhalten, ein sehr bequemer Apparat. Die durchsichtigen Körper verhalten sich nämlich, wie wir schon gesehen haben, gegen das durch sie hindurchgehende Licht sehr verschieden, und dieses Verhalten kann zur Unterscheidung einander sonst sehr ähnlicher Körper dienen. Bergkrystall und weißes Glas z. B. können in der Masse zum Verwechseln ähnlich aussehen; wenn man sie aber in dem vorhin beschriebenen Polarisationsapparate betrachtet, indem man sie auf die mittlere Blende legt, so treten bei dem Bergkrystall, wenn derselbe mehr oder weniger schief gegen seine Achse geschliffen ist, wie bei dem Glimmerblättchen, prachtvolle Farbenerscheinungen auf, während das Glas immer nur weißes Licht hindurch läßt. Nur wenn das Glas rasch abgekühlt oder durch starken Druck in seinen Elastizitätsverhältnissen gewaltsam verändert ist, zeigt es analoge Erscheinungen, und die Polarisationsapparate können also nicht bloß dazu dienen, die Art der zu untersuchenden durchsichtigen Körper, ihr Krystallsystem, die Art ihrer Krystallbildung (einfache oder Zwillingskrystalle) u. s. w. zu bestimmen, sondern bis zu gewissem Grade auch die Umstände, unter denen sich ihre Bildung vollzog. Und da die Erscheinungen auch bei dem winzigsten Partikelchen dieselben bleiben, so vermag namentlich die mikroskopische Untersuchung (mittels eines Polarisationsmikroskopes) von dem Verhalten der Objekte im polarisierten Lichte Vorteile zu ziehen. Einen glänzenden Beweis dafür liefert die mikroskopische Untersuchung der zu außerordentlich dünnen Schliffen verarbeiteten Gesteine, welche in der kurzen Zeit ihrer Ausübung die wunderbarsten, auf keinem anderen Wege bis dahin erreichbaren Resultate ergeben hat.

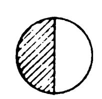
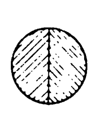
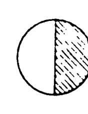


331. 332.
Turmalinplatten mit parallelen und mit gekreuzten Achsen.

Ferner üben Lösungen mancher Stoffe auf die Schwingungen des durch sie hindurchgehenden polarisierten Lichtstrahles einen merkwürdigen Einfluß aus. So dreht z. B. eine Zuckerlösung die Polarisationsebene des Lichtes, je nachdem die Lösung mehr oder weniger konzentriert, oder die durchstrahlte Schicht derselben mehr oder weniger dick ist, auch entsprechend mehr oder weniger nach rechts, wie der Zeiger der Uhr läuft. Bei einer Röhre von bestimmter Länge, die vorn und hinten mit planparallelen, durchsichtigen Glasplatten abgeschlossen ist, richtet sich die Größe des Drehungswinkels der Polarisationsebene nach dem Zuckergehalt der Lösung. Diese Erscheinung, welche Zirkularpolarisation genannt wird, hat eine große technische Bedeutung gewonnen, insofern sie einerseits in der Zuckerindustrie benutzt wird, um den Zuckergehalt des Syrups und anderer zuckerhaltiger Flüssigkeiten zu bestimmen, andererseits in der medizinischen Praxis als diagnostisches Mittel Anwendung findet, um bei gewissen Nierenerkrankungen den Harn auf seinen Gehalt an Zucker oder an Eiweiß zu untersuchen. Die Apparate, deren man sich in den Zuckerfabriken und Raffinerien bedient, um damit die Zuckerlösung in Bezug auf ihren Zuckergehalt zu prüfen, heißen Saccharimeter und bestehen im wesentlichen aus einer metallenen Röhre, oben mit einer Öffnung zum Einfüllen der Flüssigkeit versehen und an ihren beiden Enden mit durchsichtigen Glasplatten abgeschlossen. An dem hinteren

Ende liegt nach außen zu vor der Glasplatte ein Nicolsches Prisma, welches das eintretende Licht polarisiert. Am vorderen Ende befindet sich ein eben solches Prisma, das aber in einer drehbaren, mit Kreisteilung versehenen Metallhülse sitzt. Geht nun das durch das eine Prisma polarisierte Licht auch durch das zweite, so können durch Drehung des letzteren die bekannten Lichtabstufungen hervorgebracht werden. Bei Einschaltung der Zuckerlösung erscheinen sie aber im Kreise um so viel weiter nach rechts verdreht, als die Polarisationsebene abgelenkt worden ist, und die Größe der Drehung, welche ausgeführt werden muß, bis eine bestimmte Abstufung der Helligkeit erscheint, läßt den Prozentgehalt erkennen. Man ist übereingekommen, als Nullpunkt der Teilung nicht die Helligkeits- oder Dunkelheitsmaxima anzunehmen. Wie wir später sehen werden, ist das weiße Licht aus vielen verschiedenfarbigen Strahlen zusammengesetzt. Bei dem Durchgange durch Zuckerlösung verlegen sich aber die Schwingungsebenen der verschiedenen Farben auch in verschiedener Weise, entsprechend der Aufeinanderfolge der Regenbogenfarben, so daß Rot am wenigsten, dann Gelb, Grün, Blau mehr und endlich Violett am meisten abgelenkt wird. Wenn man also das vordere Prisma dreht, so wird das Gesichtsfeld nicht einfach dunkler, sondern es durchläuft zugleich den eben angegebenen Farbenkreis. In diesen gemischten Farbentönen zeigt sich nun vorwiegend ein tiefes Purpurviolett (teinte de passage), sehr leicht erkennbar, welches bei der geringsten Drehung des Analysators nach rechts oder links seinen Farbenton wesentlich verändert, so daß, wer einmal darauf aufmerksam gemacht worden ist, den Farbenton mit größter Genauigkeit wiederfindet. Auf diesen Punkt ist daher die Teilung der Saccharimeter bezogen worden, und auf ihn stellt man bei Prüfungen das Instrument ein.

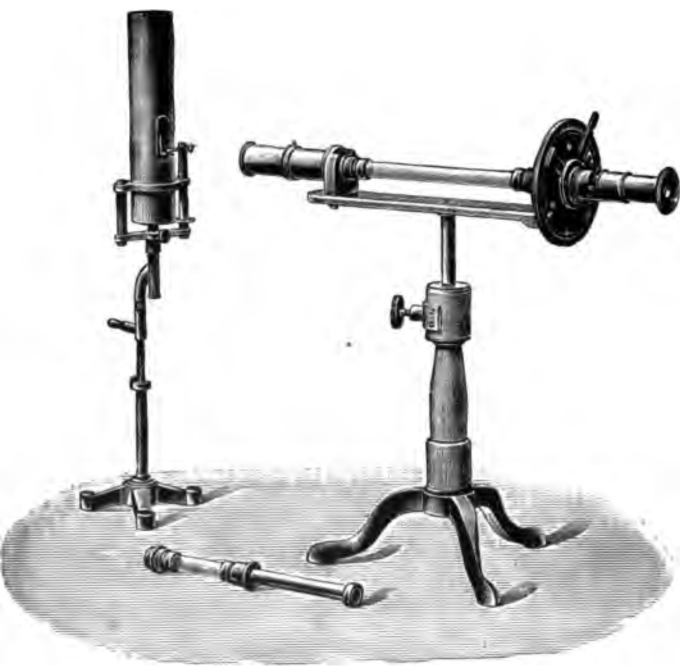


333. Drehung der Polarisationsebene im Saccharimeter.

334.

In der neuesten Zeit ist man in der Saccharimetrie von der Anwendung von Farbentönen, deren Vergleichung besonders bei gefärbten Flüssigkeiten Schwierigkeiten bereitet, abgekommen und wendet fast ausschließlich sogenannte **Halbschattenapparate** an, die eine feinere Einstellung dadurch gestatten, daß das durch einfarbiges (gewöhnliches Natrium-) Licht beleuchtete, kreisförmige Gesichtsfeld durch eine scharfe Trennungslinie in zwei Halbkreise (Abb. 334) geteilt ist, die durch Drehung des Analysators in eine bestimmte Stellung auf gleiche Helligkeit eingestellt werden und bei der minimalsten Drehung des Ana-



335. Pénombre- oder Halbschattenapparat.

lysators aus dieser Stellung heraus bedeutende Helligkeitsunterschiede aufweisen. Abb. 335 stellt einen Pénombre- oder Halbschattenapparat der Firma Schmidt & Haensch in Berlin dar. Das Gestell gleicht dem des einfachen, älteren Mitscherlichschen Polarisationsapparates, hat aber zunächst hinter dem Nicol, welches dem Auge zugekehrt ist, dem Analysator, ein kleines Fernrohr und hinter dem zweiten, der Flamme zugekehrten Nicol, dem Polarisator, eine Bergkrystallplatte von bestimmter Wellenlänge. Auf diese Platte, welche zur Hälfte den Polarisator bedeckt, ist das kleine Fernrohr eingestellt. Der Analysator ist fest mit dem Zeiger (der Alhidade) vor der geteilten Kreisscheibe verbunden, so daß die Drehung der Alhidade nach rechts oder links der Drehung des Analysators entspricht. Die Alhidade ist mit einer Noniusmaßteilung versehen und ermöglicht direkte Ablesung von Zehntelgraden und Schätzung von Zwanzigstelgraden. Als Lichtquelle für den Mitscherlichschen Halbschattenapparat dient ausschließlich eine Natriumflamme, die man dadurch erzeugt, daß man in der nicht leuchtenden Flamme eines Bunsenbrenners auf einem Platinkörbchen etwas Chlornatrium zu lebhaftem Glühen bringt. Man stellt das Instrument auf den hellsten Teil der gelben Flamme ein, so daß nach entsprechender Bewegung des Fernrohres die Trennungslinie zwischen Polarisator und Bergkrystallplatte möglichst deutlich und scharf hervortritt. Es empfiehlt sich, in verdunkeltem Zimmer zu arbeiten. Dreht man den Analysator 3 bis 4 Grad vom Nullpunkte nach rechts, so erscheint die eine Hälfte des Gesichtsfeldes heller, die andere dunkler. Die umgekehrte Erscheinung beobachtet man beim entsprechenden Linksdrehen. Der Punkt, für welchen beide Hälften gleichstark beleuchtet erscheinen, ist der Nullpunkt des Instrumentes und der Ausgangs- und Endpunkt jeder analytischen Beobachtung.

Die zu analysierenden Lösungen müssen möglichst klar und hell von Farbe sein. Zu ihrer Aufnahme dient eine mit planparallelen Gläsern zu verschließende Beobachtungsröhre. Nachdem diese mit der zu untersuchenden, von Luftblasen möglichst freien Flüssigkeit gefüllt und in den Apparat eingelegt ist, stellt man das Fernrohr zunächst wieder auf größte Deutlichkeit der Trennungslinie ein. Enthält die Lösung einen polarisierenden Körper, so erscheinen die beiden Hälften des Gesichtsfeldes der Nulleinstellung verschieden hell; die Größe der Drehung der Polarisationsebene ergibt die Gradablesung, welche man durch Drehen des Analysators bis zum Eintritt der Gleichheit der Helligkeit erhält. Die Länge der Röhre und die Einteilung ist in der Regel so gewählt, daß jeder Grad der Polarisation einem Gramm Traubenzucker in 100 ccm der analysierten Flüssigkeit entspricht. Bei Harnanalysen wird die Grammzahl meist als Prozentzahl aufgeführt. Traubenzucker und Rohrzucker drehen nach rechts, Eiweiß nach links.

Photometrie.

Intensität. Entfernungsgesetz. Violles und Siemens' Platinlichteinheiten. Carcellampe, Spermaceti- und Vereins-Paraffinkerze. Amylacetatlampe. Einheit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Rumfordsches Schattenphotometer. Ritschies, Bunsens, Lummer-Brodhuns und Leonhard Webers Photometer. Vergleichung einiger Lichtstärken.

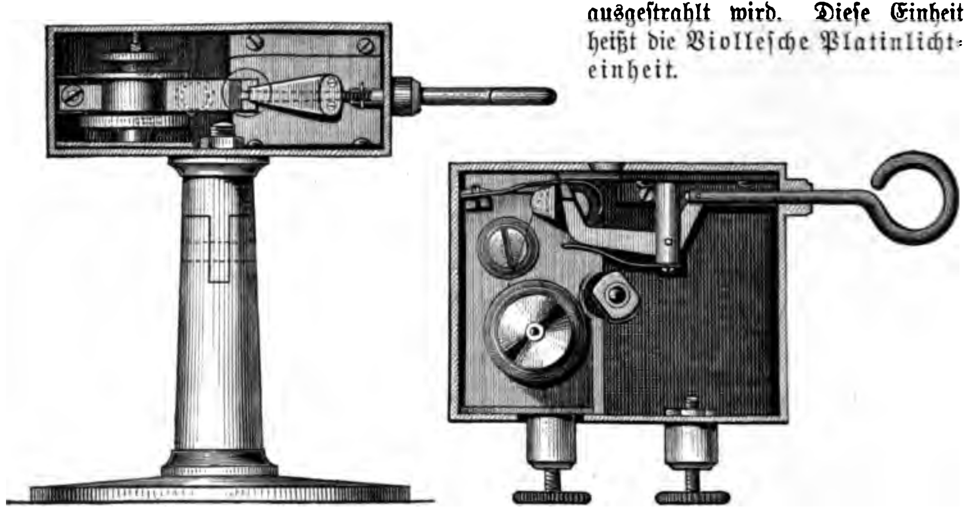
Intensität. Da sich das Licht nach allen Seiten fortpflanzt, so muß sich nach einem einfachen geometrischen Gesetz seine Intensität mit dem Quadrate der Entfernung vermindern. Denken wir uns einen leuchtenden Punkt im Mittelpunkt einer hohlen Kugel, so wird die von dem Punkte ausgehende Lichtmenge sich über die ganze Oberfläche der Kugel gleichmäßig verteilen. Denken wir uns denselben leuchtenden Punkt in der Mitte einer Hohlkugel, deren Halbmesser zweimal so groß ist als der der ersten, so wird auch ihre Oberfläche von der vom Punkte ausgesandten Lichtmenge gleichmäßig beleuchtet sein. Nun verhalten sich aber die Oberflächen zweier Kugeln wie die Quadrate ihrer Halbmesser, also in unserem Beispiele wie 1 : 4; daher wird die zweite Kugel, weil dieselbe Lichtmenge sich über eine viermal größere Oberfläche gleichmäßig verteilt, nur den vierten Teil der Intensität pro Flächeninhalt besitzen, wie die erste. Eine Kerze leuchtet demnach bei 2 m Entfernung nur ein Viertel so stark wie bei einem Abstande von 1 m.

Um die Lichtstärke zu messen, hat man verschiedene sehr sinnreiche Verfahren erdacht. Mit denselben beschäftigt sich ein besonderer Teil der Optik, die Photometrie, welche

besonders in der neueren Zeit infolge des gewaltigen Aufschwunges der Elektrotechnik und der dadurch bedingten Erweiterung der Einführung der elektrischen Beleuchtung eine große praktische Bedeutung gewonnen hat und deshalb in diesem Abschnitte eingehender behandelt werden soll.

Unter Gesamtlichtstärke einer Lichtquelle versteht man die von ihr auf eine geschlossene, sie umgebende Fläche gesandte Lichtmenge, unter mittlerer räumlicher Lichtstärke die Gesamtlichtstärke dividiert durch 4π, und unter Lichtstärke oder Leuchtkraft in einer bestimmten Richtung diejenige Lichtmenge, welche die Lichtquelle auf die zu dieser Richtung senkrechte, um die Längeneinheit entfernte Flächeneinheit aussendet.

Viollesche Platinlichteinheit. Auf dem internationalen Elektrikerkongresse zu Paris im Frühjahr 1884 ist dem Vorschlage des französischen Physikers Violle gemäß die Lichteinheit folgendermaßen definiert worden: Die Einheit des weißen Lichts ist diejenige Lichtmenge, welche in senkrechter Richtung von einem Quadratzentimeter geschmolzenen reinen Platins bei der Erstarrungstemperatur ausgestrahlt wird. Als Einheit jeder einfachen Lichtart gilt jene Lichtmenge derselben Art, welche in senkrechter Richtung von einem Quadratzentimeter geschmolzenen reinen Platins bei der Erstarrungstemperatur ausgestrahlt wird. Diese Einheit heißt die Viollesche Platinlicht-einheit.



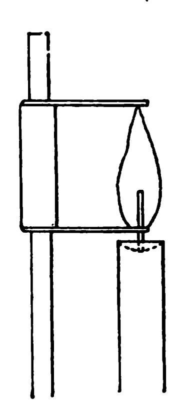
336 und 337. Siemenssche Platinlichteinheit.

Siemenssche Platinlichteinheit. Da die Viollesche Einheit sehr schwer zu reproduzieren ist, hat Werner v. Siemens zur bequemeren Herstellung derselben einen Apparat konstruiert, bei welchem ein dünnes Platinblech durch den galvanischen Strom zum Schmelzen gebracht und das Licht des schmelzenden Platins benutzt wird. Es wird dabei vorausgesetzt, daß bei chemisch reinem Platin die vom schmelzenden Metall ausgestrahlte Lichtmenge gleich der vom erstarrenden Metall ausgestrahlten ist. Das Platinblech ist in einen kleinen Metallkasten (Abb. 336 u. 337) eingeschlossen, in dessen einer schmalen Wand sich eine nach innen konisch verjüngende Öffnung befindet, deren kleinster Querschnitt möglichst genau 0,1 qcm Inhalt hat. Dicht hinter dieser Öffnung befindet sich das sie nach allen Seiten überragende Platinblech, welches man durch einen ganz allmählich zu verstärkenden galvanischen Strom zum Glühen und zum Schmelzen bringen kann. Das von der Öffnung im Moment vor dem Durchschmelzen, also vor dem Erlöschen, ausgestrahlte Licht ist dann genau $^1/_{10}$ der Violleschen Einheit. Ein kleiner im Gehäuse der Lampe angebrachter Zangenmechanismus ermöglicht es, durch einfache Hin- und Zurückschiebung eines Griffes ein neues Stück des auf eine Rolle aufgewickelten Platinbleches einzuschalten und den Versuch schnell zu wiederholen.

Violle schmolz 1 kg Platin in einem Tiegel von ungelöschtem Kalk mittels des Knallgasgebläses. Nach Versuchen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt führt indessen

diese Schmelzmethode zu unsicheren und ungenauen Resultaten; aber auch andere Versuche der Reichsanstalt, bei welchen das Platin, um jede Verunreinigung desselben zu vermeiden und eine glatte Oberfläche zu erzielen, durch einen Akkumulatorenstrom zum Schmelzen gebracht wurde, lieferten keine befriedigenden Resultate, so daß es ratsam erschien, vorläufig von der Violleschen Einheit und auch von der Siemensschen Form derselben, die sich gleichfalls als nicht praktisch erwies, bei den Lichtmessungen abzusehen.

Einfache technische Lichteinheiten. In der Praxis wendet man als Maßeinheiten für die Lichtstärke gewisse Lampen und Kerzen an, welche sich jederzeit und an jedem Orte bequem herstellen lassen, von denen als die gebräuchlichsten hier folgende erwähnt seien:


338. Messung der Flammenhöhe.

Die französische Carcellampe ist eine Rundbochtlampe, welche mit gereinigtem Rüböl gespeist wird. Der 30 mm weite cylindrische Docht ist von einem Glascylinder umgeben, der in der Höhe der Flamme eine Einschnürung besitzt. Die Höhe der Flamme, welcher von innen und von außen Luft zugeführt wird, beträgt 40 mm. Das Öl wird dem Dochte aus einem im Fuße der Lampe befindlichen Behälter durch ein einfaches Uhrwerk zugeführt. Die Lampe besitzt die richtige Lichtstärke, wenn der Verbrauch an gereinigtem Rüböl 42 g in der Stunde beträgt. Schwankt der Verbrauch zwischen 40 und 44 g pro Stunde, so wird die Lichtstärke ihm proportional gesetzt. Die Messung der Flammenhöhe geschieht entweder mittels eines Zirkels oder zweier horizontaler Drähte, die sich an einer vertikalen Säule verschieben lassen (Abb. 338).

Die englische (Normal-) Wallrat-(Spermaceti-)kerze soll bei einer Flammenhöhe von 45 mm 7,77 g in der Stunde verbrauchen. Zur Bestimmung des Materialverbrauchs dienen besonders konstruierte Kerzenwagen.

Die Deutsche (Vereins-)Paraffinkerze, welche unter Aufsicht des Deutschen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern nach festen Normen hergestellt wird, 20 mm im Durchmesser hat, und von welcher 12 Stück auf 1 kg kommen, soll bei einer Flammenhöhe von 50 mm benutzt werden.

Einen wesentlichen Fortschritt gegenüber den soeben beschriebenen Lichtmaßen bildet die von Hefner von Alteneck konstruierte und von ihm als Lichteinheit vorgeschlagene Amylacetatlampe. Als Einheit der Lichtstärke definiert er die Leuchtkraft einer frei in reiner und ruhiger Luft brennenden Flamme, welche sich aus dem horizontalen Querschnitt eines massiven, mit Amylacetat gesättigten Dochtes erhebt. Dieser Docht erfüllt vollständig ein kreisrundes Neusilberröhrchen, dessen lichte Weite 8 mm, dessen äußerer Durchmesser 8,3 mm beträgt und welches eine freistehende Länge von 25 mm besitzt. Die Höhe der Flamme soll, vom Rande der Röhre bis zur Spitze gemessen, 40 mm betragen. Die Messungen sollen erst 10 Minuten nach der Entzündung der Flamme beginnen.

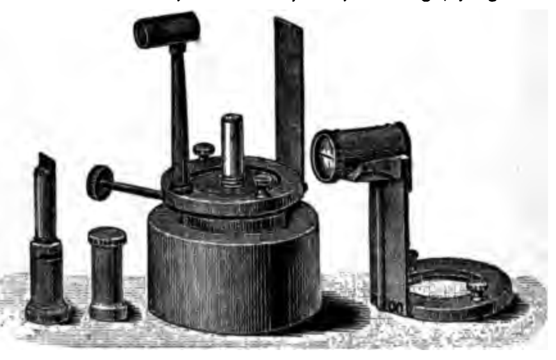
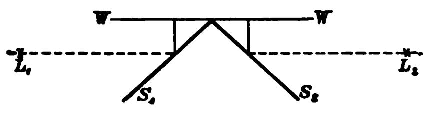

339. Hefner-Lampe.

Abb. 339 stellt die Hefner-Lampe nebst Zubehör dar. Aus dem cylindrischen, etwa $^1/_4$ l fassenden, innen verzinnten Messinggefäß erhebt sich das cylindrische Dochtrohr. Der Docht, welcher durch ein Zahngetriebe auf und nieder bewegt werden kann, ist gebildet aus einem aus 15—20 Fäden gebildeten Strange von sogenanntem Lunten- oder Dochtgarn, einem groben, sehr weichen Baumwollengespinst. Er muß das Dochtrohr ganz und sicher, aber nicht zu sehr gepreßt ausfüllen, so daß er den Brennstoff im Überschuß über die verbrennende Menge emporzusaugen im stande ist.

Die Flammenhöhe wird mit einer beigegebenen Visiervorrichtung bestimmt. Nach Versuchen von Liebenthal ändert sich die Leuchtkraft bei Flammenhöhen über 40 mm um 2,5 bis 3 % pro 1 mm Höhenänderung. Ferner darf nur reines Amylacetat (Siedepunkt zwischen 138 und 140° C.) angewandt werden.



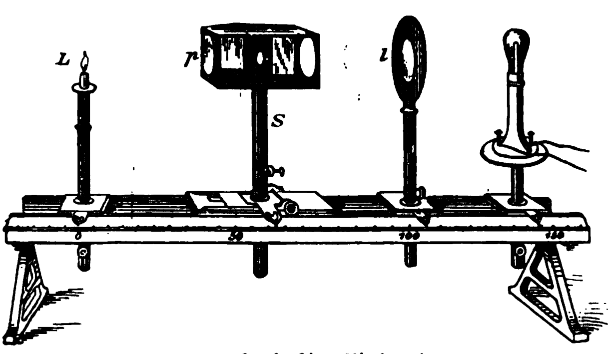
340. Photometer von Ritchie.

Die Hefner-Lampe ist unter den besprochenen Lichtmaßen die einzige, welche allen Anforderungen der Technik genügt; sie ist deshalb auch von den beteiligten Kreisen der Technik Deutschlands als Einheit angenommen und wird seit längerer Zeit von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt amtlich beglaubigt.

Neue Lichteinheit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat — nachdem umfangreiche, von ihr angestellte Versuche ergeben hatten, einerseits daß weder die Viollesche, noch die Siemenssche Platineinheit sich mit der einer Normaleinheit entsprechenden Sicherheit und Genauigkeit reproduzieren lasse, andererseits, daß reines Platin als strahlende Oberfläche beizubehalten geeignet sei, sofern nur andere Temperaturfixpunkte gewählt werden, als diejenigen des Schmelz- oder Erstarrungspunktes — in jüngster Zeit eine neue Lichteinheit definiert und hergestellt, welche auf der experimentell bestätigten Voraussetzung beruht, daß chemisch reines glühendes Platin bei derselben Temperatur stets dieselbe Lichtmenge aussendet.

Als Lichteinheit wird diejenige Lichtmenge vorgeschlagen, welche ein Quadratzentimeter glühenden Platins von bestimmt zu definierender Temperatur aussendet. Die Temperatur des Platins soll dadurch definiert sein, daß seine Gesamtstrahlung zu der durch ein bestimmtes Absorptionsmittel hindurchgelassenen Teilstrahlung in einem bestimmten Verhältnis stehe, und das Maß für beide Strahlungsmengen soll die durch sie bewirkte Erwärmung eines Bolometers (vergl. später Galvanismus) sein. Das absorbierende Mittel soll eine von zwei parallelen Quarzplatten von bestimmter Dicke begrenzte Wasserschicht von bestimmter Dicke sein.

Das Prinzip für die praktische Herstellung einer solchen Lichteinheit ist also folgendes: Ein durch elektrischen Strom zum Glühen gebrachtes Platinblech bestrahlt durch ein Diaphragma von 1 Quadratzentimeter Fläche ein Bolometer einmal mit seiner Gesamtstrahlung, das andere Mal mit der durch das Absorptionsmittel hindurchgelassenen Teilstrahlung. Das Verhältnis der beiden Strahlungsmengen wird durch das Verhältnis der entsprechenden Ausschläge eines mit dem Bolometer verbundenen Galvanometers angezeigt. Reguliert man den Strom so lange, bis die beiden Strahlungsmengen sich wie 10 : 1 verhalten, so soll die Lichtmenge, welche das Platinblech senkrecht zu seiner Fläche durch das Diaphragma hindurchsendet, die Lichteinheit sein.

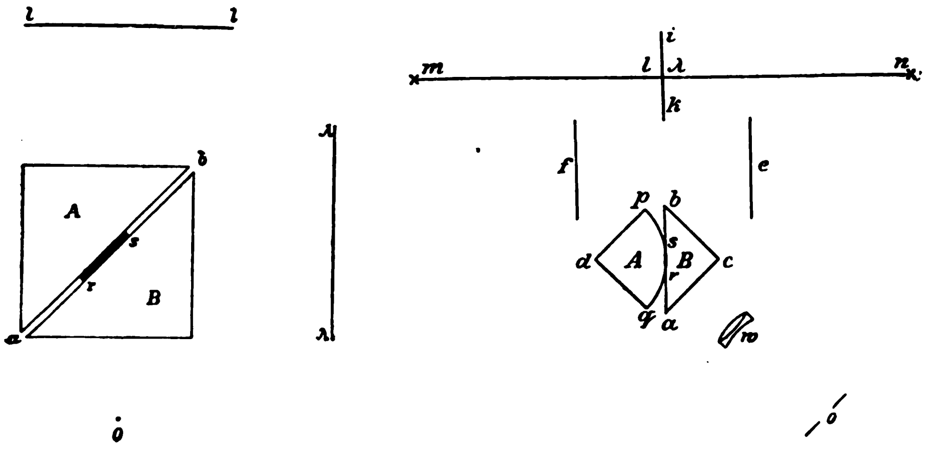


341. Bunsensches Photometer.

Nach diesem Prinzipe ist die Lichteinheit hergestellt worden. Der Platinglühapparat besteht aus einem Dreifuß, welcher eine Marmorplatte trägt. Diese wird von unten von zwei Kupferdrähten durchsetzt, welche mit zwei auf der Platte stehenden Messingbalken verbunden sind. An den Messingbalken befinden sich Klemmbacken, zwischen denen die ungefähr 25 mm breiten, 60 mm langen und 0,015 mm dicken Platinbleche mit der Breitseite senkrecht festgeklemmt werden können. Der von einer Akkumulatorenbatterie von 32 Volt gelieferte Strom kann mittels eingeschalteten Regulierwiderstandes zwischen

50—80 Ampère genau reguliert werden. Auf die Marmorplatte wird eine doppelwandige, mit geeigneter Wasserspülung versehene Metallglocke gesetzt, deren Vertikalwand zur Aufnahme des Diaphragmas von 1—4 qcm durchbrochen ist. Das Absorptionsgefäß besteht aus einem cylindrischen Glasring, dessen Öffnungen durch zwei parallele Quarzplatten verschlossen werden, die je 1 mm dick sind und eine Wasserschicht von 2 cm Dicke einschließen. Diese Lichteinheit, welche mit einer Genauigkeit von 1 % jederzeit reproduziert und den verschieden gefärbten Lichtquellen sehr einfach durch Vorschrift eines anderen Strahlungsverhältnisses angepaßt werden kann, soll fortan den Lichtmessungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt als Normaleinheit zu Grunde gelegt werden.

Bestimmung von Lichtstärken. Die Vergleichung und Bestimmung von Lichtstärken geschieht nun im allgemeinen durch die physiologische Einwirkung auf unser Auge. Das Auge allein aber besitzt nur in geringem Grade die Fähigkeit, die Helligkeit zweier Lichtstärken quantitativ zu beurteilen; es muß durch besondere Apparate, Photometer, unterstützt werden. Die Photometer haben nur den Zweck, dem Auge die günstigsten Vergleichungsbedingungen darzubieten und ihm die Schätzung zu erleichtern. Bei der



342 u. 343. Einrichtung des Lummer-Brodhunschen Photometers.

Konstruktion der Photometer wird die Erfahrungsthatsache benutzt, daß das Auge verhältnismäßig leicht im stande ist, zu beurteilen, wenn zwei neben einander liegende gleichmäßig beleuchtete Flächenstücke gleich hell sind, daß es aber noch leichter und sicherer anzugeben vermag, ob zwei symmetrisch gelegene beleuchtete Felder sich von einem dritten gleich hell oder gleich dunkel abheben. Die Empfindlichkeit des Auges für Beurteilung der Helligkeitsgleichheit wird um das Doppelte übertroffen von seiner Empfindlichkeit für die Beurteilung geringer Kontrastunterschiede. Man unterscheidet demgemäß Gleichheits- und Kontrastphotometer.

Im Folgenden sollen noch die gebräuchlichsten Photometer beschrieben werden:

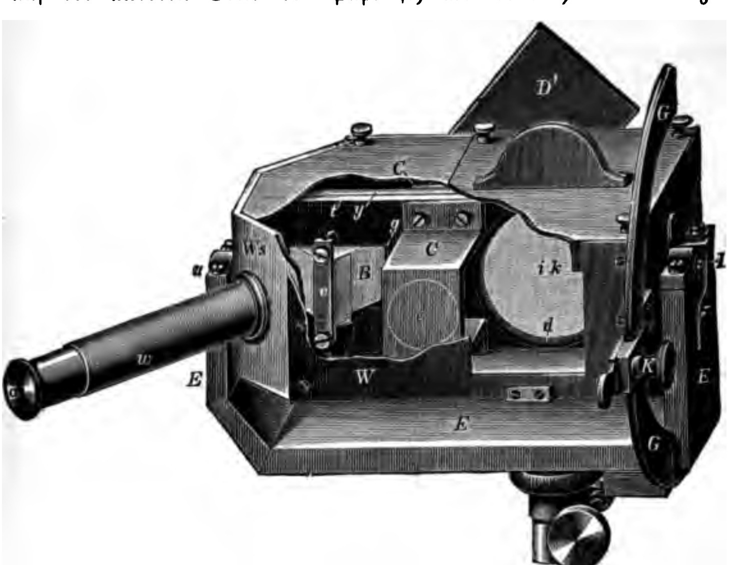
Einfache technische Photometer. Eins der ältesten ist das Rumfordsche, bereits von Lambert angegebene Schattenphotometer. Vor einem weißen Schirm befindet sich in geringer Entfernung ein undurchsichtiger vertikaler Stab. Man stellt die beiden zu vergleichenden Lichtquellen so auf, daß die durch den Stab entstehenden beiden Schatten unmittelbar an einander grenzen, und daß die Lichtbündel den Schirm in den Schattengebieten unter demselben Winkel treffen. Erscheinen dann die beiden Schatten gleich dunkel, so verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen wie die Quadrate ihrer Entfernungen von den durch sie beleuchteten Schatten.

Beim Ritchieschen Photometer Abb. 340 senden die beiden Lichtquellen L_1 und L_2 ihre Strahlen auf zwei gleiche Spiegel S_1 und S_2, die unter einem Winkel von 45 Grad

gegen die durchscheinende Platte WW geneigt sind und in einer Kante zusammenstoßen. Man verschiebt L_1 und L_2, bis gleiche Helligkeit eintritt, und berechnet mittels des Entfernungsgesetzes das Verhältnis ihrer Lichtstärken.

Das Bunsensche Photometer. Das weitverbreitetste und am meisten gebräuchliche ist das Fettfleckphotometer von Bunsen. In seiner einfachsten Form besteht es aus einem vertikal gestellten Papierblatt, welches in seiner Mitte einen kreisrunden gleichmäßigen Ölfleck hat. Die beiden miteinander zu vergleichenden Lichtquellen werden zu beiden Seiten des Papierblattes in der Achse derselben aufgestellt. Das nicht geölte Papier strahlt vorzugsweise reflektiertes Licht aus, während das vom Fettfleck ausgesandte diffuse Licht hauptsächlich durchgelassenes Licht ist.

Man sucht durch Verschieben des Papierschirms zwischen den beiden Lichtquellen diejenige Stellung auf, bei welcher der Fettfleck, in schräger Richtung betrachtet, verschwindet. Diese Stellung wird verschieden sein, je nachdem man auf der einen oder auf der anderen Seite des Papierschirms beobachtet. Aus zwei solchen auf verschiedenen Seiten angestellten Beobachtungen läßt sich das Verhältnis der Lichtstärken ermitteln.



344. Lummer-Brodhunsches Photometer.

Einfacher gestaltet sich die Bestimmung, wenn man unter Zuhilfenahme einer dritten konstanten Lichtquelle die Substitutionsmethode anwendet, d. h. die beiden zu vergleichenden Lichtquellen nach einander mit der in konstanter Entfernung vom Schirm aufgestellten Hilfslichtquelle vergleicht, indem man sie so lange verschiebt, bis der Ölfleck verschwindet. Das Verschwinden beobachtet man dann natürlich beide Male auf einer und derselben Seite, das Verhältnis der Lichtstärke ergibt sich dann wieder einfach durch das Entfernungsgesetz.

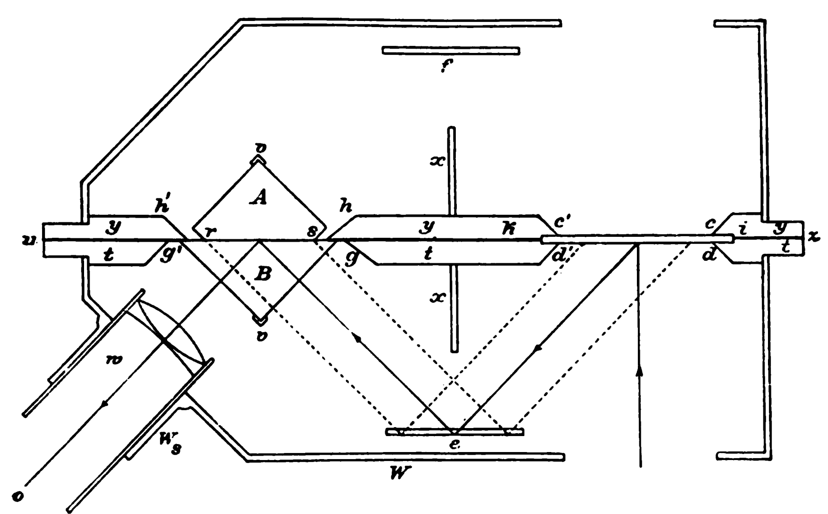
Gewöhnlich wird das Bunsensche Photometer nicht als Gleichheits-, sondern als Kontrastphotometer benutzt, indem man mit Hilfe zweier zu beiden Seiten des Papierschirms angebrachten gleichen und gleich geneigten Spiegel beide Seiten des Papierschirms zu gleicher Zeit erblickt und letzteren nun so lange zwischen den beiden mit einander zu vergleichenden Lichtquellen verschiebt, bis die beiden Fettfleckbilder sich aus ihrer Umgebung gleich hell oder gleich dunkel abheben. Man erhält dann das gesuchte Verhältnis der beiden Lichtstärken durch eine einzige Beobachtung mittels des Entfernungsgesetzes.

Abb. 341 zeigt das Bunsensche Photometer nebst Photometerbank nach Krüß. Die Glühlampe nebst Linse l bilden die konstante Hilfslichtquelle, die Kerze L die zu bestimmende oder mit einer anderen Lichtquelle zu vergleichende Lichtquelle. Der Photometerschirm ist mit zwei gleichen, meßbar verstellbaren Spiegeln, sowie mit Mikrometerverschiebung versehen und um einen Winkel von 180° drehbar. Alle Teile sind in ihren Höhen verschiebbar und lassen sich mit leichter und sicherer Führung auf der mit einer Längenteilung versehenen Photometerbank meßbar verschieben.

Lummer-Brodhunsches Photometer. Ein Mangel des Bunsenschen Photometers besteht darin, daß der Fettfleck nicht nur Licht hindurchläßt, sondern auch reflektiert, und daß das Papier nicht nur Licht reflektiert, sondern auch hindurchläßt. Von diesem Mangel frei ist das Lummer-Brodhunsche Photometer.

Der wesentlichste Bestandteil dieses Photometers ist ein Glaswürfel, welcher aus zwei mit ihren Hypotenusenflächen genau eben auf einander abgeschliffenen, rechtwinkeligen Prismen besteht. Das Prinzip der Konstruktion ist folgendes (Abb. 342): Zwei rechtwinkelige Prismen A und B seien mittels einer Substanz von gleichem Brechungsverhältnisse wie Glas bei rs an einander gekittet, während die Hypotenusenflächen bei ar und sb durch Luft getrennt seien. ll und λλ seien zwei diffus leuchtende Flächen, dann wird an den Stellen ar und sb der Hypotenusenfläche das von λλ kommende Licht nach 0 reflektiert, während es an den Stellen rs nach dem Prisma A hindurchgeht. Das Umgekehrte wird mit dem von ll kommenden Lichte in Bezug auf 0 stattfinden. Akkommodiert also ein bei 0 befindliches Auge auf die Fläche arsb, so erblickt es den Teil rs in dem Lichte von ll, die Teile ar und sb in dem Lichte von λλ erleuchtet, und bei einem bestimmten Intensitätsverhältnisse der Flächen ll und λλ wird arsb als eine vollkommen gleichmäßig helle Fläche erscheinen.

Bei der praktischen Ausführung des Glaswürfels wird von der Hypotenusenfläche des einen rechtwinkeligen Prismas A, welche nicht eben, sondern kugelförmig geschliffen ist, die obere Glasschicht durch Anschleifen bis auf eine scharf begrenzte ebene Kreisfläche entfernt und dann das Prisma mit dieser ebenen Kreisfläche gegen die gleichfalls genau ebene Hypo-



345. Hauptschnitt durch das Lummer-Brodhunsche Photometer.

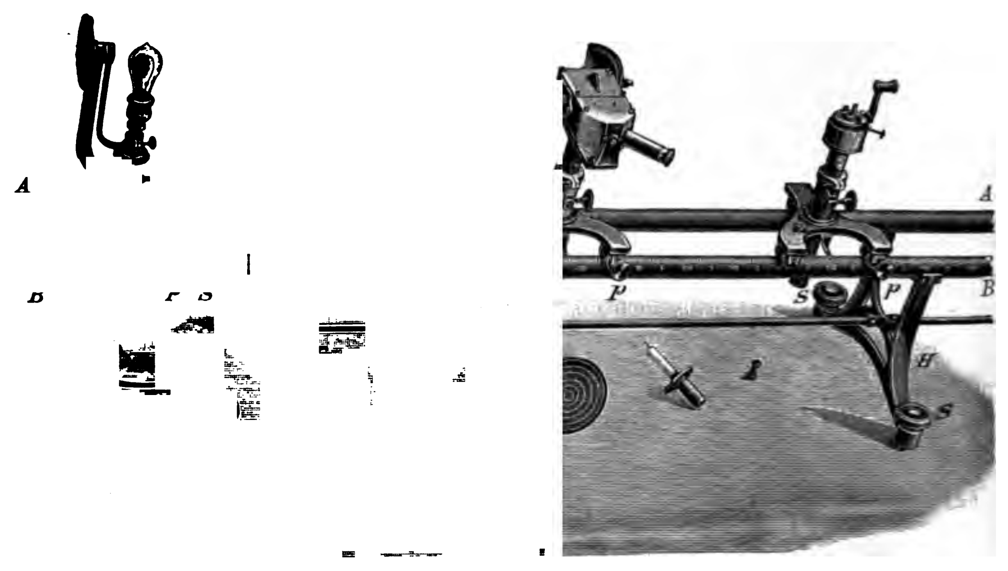
tenusenfläche des Prismas B so fest angepreßt, daß an der Berührungsstelle keine Luftschicht zwischen den Prismen bleibt.

Bei Anwendung dieser Glaswürfelkonstruktion erblickt ein bei 0 befindliches Auge (vergl. Abb. 343) einen elliptischen, scharf begrenzten Fleck, welcher bei Gleichheit der Felder vollkommen verschwindet.

Die Einrichtung des Lummer-Brodhunschen Photometers ist aus der in Abb. 343 skizzierten Anordnung ersichtlich. Senkrecht zur Achse der Photometerbank steht der Schirm ik, der gar kein Licht hindurchläßt und dessen Seiten von den beiden zu vergleichenden Lichtquellen n und m erleuchtet werden. Das von den Schirmseiten λ und l ausgehende diffuse Licht fällt auf die beiden Spiegel e bezw. f, die es senkrecht auf die Kathetenflächen bc und dp der Prismen B und A reflektieren. Der Beobachter bei O blickt durch die Lupe w in senkrechter Richtung auf ac und stellt scharf auf die Fläche arsb ein. Die beiden diffus beleuchteten Flächen λ und l sind gleich hell, wenn das Gesichtsfeld gleichmäßig hell erscheint, also der scharf begrenzte elliptische Fleck verschwindet. Der Schirm ik, welcher aus einer Gipsplatte besteht, die Spiegel e und f, der Glaswürfel AB und das Okularrohr ow sitzen im Photometergehäuse, das in geeigneter Weise auf dem Schlitten der Photometerbank (vergl. Abb. 346) befestigt ist.

Abb. 344 gibt eine perspektivische Ansicht des nach dieser Anordnung von der Firma Franz Schmidt & Haensch in Berlin ausgeführten Photometers, während Abb. 345 den Hauptschnitt oder die Mittelpunktsebene darstellt, d. h. die Ebene, in der die vier Mittelpunkte der beiden Spiegel e und f, der Fläche r s und des Schirmes i k, sowie die auf der Kathetenfläche a c des Prismas B senkrecht stehende Okularachse liegen. Diese Mittelpunktsebene steht senkrecht auf der Symmetrieebene des Apparates, d. i. senkrecht auf der Ebene der Berührungsfläche r s, die mit der Mittelebene des Schirmes i k zusammenfällt. In der Mittelpunktsebene liegt die Umdrehungsachse u z, um welche der Apparat um 180° gedreht werden kann.

In unten folgenden Abb. 346 ist die Photometerbank in der von der Firma Hartmann & Braun ausgeführten Form wiedergegeben. Die über 2 m langen Stahlrohre A A, B B sind auf dem gußeisernen Gestell H H gelagert, das mittels der Stellschrauben S horizontiert werden kann. Auf den Stahlrohren rollen die die einzelnen



346. Photometerbank.

Photometerteile tragenden Wagen und können an jeder Stelle mittels Schrauben p festgeklemmt werden.

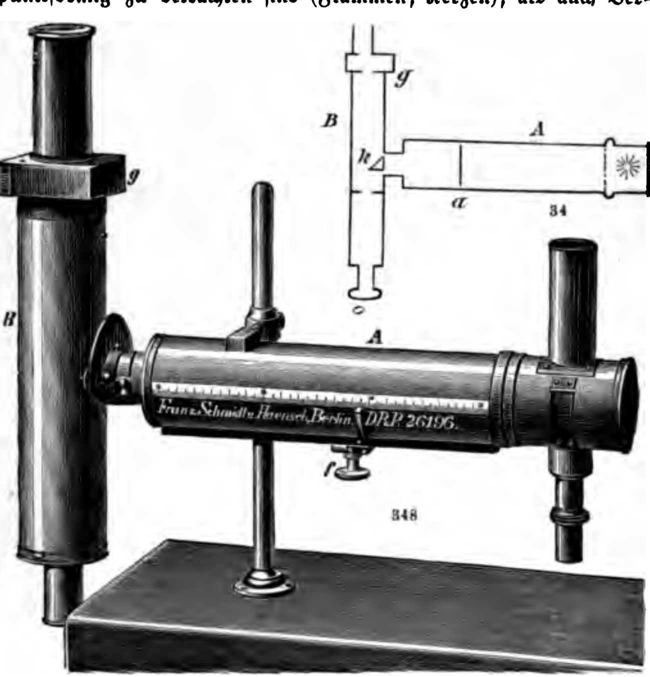
Jeder Wagen trägt einen Index, der über einer auf der äußeren Seitenfläche der einen Schiene eingeätzten Millimeterteilung gleitet.

In der Mitte sind die Wagen vertikal durchbohrt und mit einer starken Hülse versehen, in der sich durch Zahngetriebe ein Stahlrohr auf- und abbewegen und in jeder Höhe festklemmen läßt, das zur Aufnahme von Photometergehäuse, Lampen- und Kerzenhalter, Hefnerlampe, Glühlampe u. s. w. dient.

Das Photometer von Leonhard Weber hat folgende Einrichtung (Abb. 347 u. 348): Eine starke Grundplatte, die zugleich als Aufbewahrungskasten für die zum Photometer gehörigen Utensilien dient, trägt eine vertikale Säule, an welcher das feste, innen geschwärzte horizontale Rohr A befestigt ist, dessen mittlerer stärkerer Teil in seiner ganzen Länge eine Millimeterskala trägt. Am rechten Ende von A befindet sich ein durch Bajonettverschluß angesetztes Gehäuse für die Vergleichslichtquelle, eine Benzinkerze, welche die in einem Ringe befindliche, durch das Zahngetriebe f in dem Rohre bewegliche, vertikale Milchglasplatte a beleuchtet. Der Abstand der Milchglasplatte von der Benzinkerze kann mittels eines Index an der Millimeterskala abgelesen werden. Das Lampengehäuse hat rechts einen abnehmbaren Deckel, links ist es gegen den Hohlraum des Tubus A durch eine Glasscheibe abgeschlossen; es enthält ferner eine Visiervorrichtung zur Einstellung der normalen Flammenhöhe. Mit dem Tubus A ist der zu ihm senkrechte, innen geschwärzte Tubus B verbunden, welcher um die Achse von A meßbar gedreht und in jeder Neigung durch eine Klemmschraube

festgestellt werden kann. In der Mitte des Tubus B befindet sich ein Reflexionsprisma k, welches das von der Benzinkerze ausgesandte Licht nach dem Okular O reflektiert. Am anderen Ende von B befindet sich ein Blechkasten g, in welchen Milchglasplatten eingeschoben werden können, die von den zu vergleichenden Lichtquellen beleuchtet werden. Durch geeignete Blendvorrichtungen wird erreicht, daß das bei O beobachtende Auge das Gesichtsfeld durch die äußerst scharf gehaltene Prismenkante in zwei gleiche Hälften geteilt sieht, von denen die rechte nur Licht von A her, die linke nur solches von g her empfängt. Sind beide Lichtmengen an Farbe und Helligkeit gleich, so verschwimmen beide Hälften des Gesichtsfeldes bis auf eine kaum merkliche Trennungslinie in ein gleichmäßiges Bild.

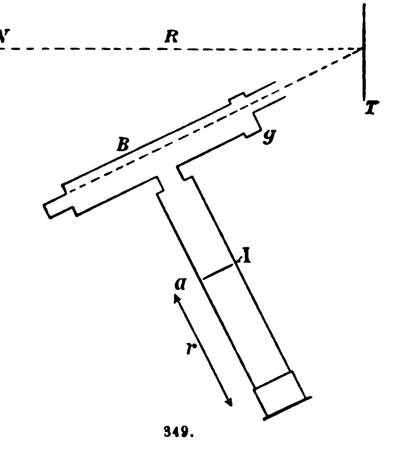
Mit dem Weberschen Photometer können sowohl Vergleichungen von Lichtquellen ausgeführt werden, die als punktförmig zu betrachten sind (Flammen, Kerzen), als auch Vergleichungen diffus beleuchteter Flächen.



847 u. 848. Photometer von Leonhard Weber.

Bei der Vergleichung zweier punktförmigen Lichtquellen wird nach einander durch jede von ihnen eine bei g eingeschobene Milchglasplatte (nötigenfalls auch mehrere, deren Schwächungskoeffizienten besonders zu bestimmen sind) beleuchtet und jedesmal durch Verschieben der Platte a auf gleiche Helligkeit beider Hälften des Gesichtsfeldes eingestellt.

Die Helligkeit des diffusen Lichtes für eine bestimmte Stelle im Raume gibt man ziffernmäßig an, indem man sich an jener (völlig dunkel gemachten) Stelle eine ebene Fläche (einen mattierten Milchglasschirm) aufgestellt denkt und ermittelt, wie viel Lichteinheiten in bestimmter Entfernung (1 m) senkrecht ihr gegenüber aufgestellt werden müssen, um dieselbe ebenso hell zu beleuchten, wie durch das diffuse Licht thatsächlich geschieht. Demgemäß wählt man behufs Bestimmung von diffusem Licht an irgend einer Stelle des Raumes die durch Abb. 349 skizzierte Anordnung. Man stellt daselbst eine mattweiße Tafel T auf und richtet, nachdem man aus dem Kasten g alle Glasplatten entfernt hat, den Tubus B derart auf die Tafel, daß man ihren Mittelpunkt in der Mitte des Gesichtsfeldes links hat, und verfährt alsdann wie vorhin: man verschiebt die von der Benzinkerze beleuchtete Milchglasplatte a so lange, bis beide Hälften des Gesichtsfeldes gleich hell erscheinen.



349.

Zum Schlusse sei noch zur Vergleichung der gebräuchlichsten Lichtstärken mitgeteilt, daß nach der Lichtmessungskommission des Vereins der Gas- und Wasserfachmänner das Verhältnis:

$$\frac{\text{deutsche Vereinsparaffinkerze}}{\text{Amylacetatlampe}} = 1{,}224 \text{ und}$$

$$\frac{\text{Durchschnittliche englische Normalkerze}}{\text{Amylacetatlampe}} = 1{,}151$$

ist.

Spiegel und Spiegelapparate.

Der Spiegel ein Kulturmittel. Antike Spiegel. Gesetze der Reflexion. Das Spiegelbild. Gespenstererscheinung auf der Bühne. Winkelspiegel. Debuskop. Kaleidoskop. Spiegelsextant. Reflexionsgoniometer. Heliostat und Heliotrop. Gauß-Poggendorffsche Spiegelablesungsmethode. Spiegelung gekrümmter Flächen. Konkav- und Konvexspiegel. Brennpunkt und Brennweite. Reelle und virtuelle Bilder.

Kein Dichter hat die Reize des Lichtes je ausgesungen, kein Auge sie alle gekostet. Alles Sichtbare ist in vollem Sinne des Wortes ein Spiegel, aus welchem die Urquelle des Lichtes uns entgegenstrahlt. Die rote Apfelblüte im Frühling, der in der Abendsonne erglühende Gipfel des Eisberges, der sanfte Strahl aus dem Auge der Geliebten — wie sie alle durch ihre eigene Gewalt fesseln, haben sie doch nur ihr Licht geliehen; sie wären für unser Auge unsichtbar, wenn ihnen nicht die Fähigkeit, die auf sie fallenden Strahlen zurückzuwerfen, innewohnte. Wenn die Lichtwellen von jedem Körper, den sie treffen, verschluckt (absorbiert) würden und nicht wiederkämen, wie traurig, wie öde wäre die Welt! Überall die tiefste Finsternis für unser Auge — und nur, wenn wir es direkt der Sonne oder den Fixsternen zuwendeten, oder wenn wir zufällig damit einem Blitz, dem Scheine des Nordlichts oder der brennenden Flamme begegneten, würden wir einen um so stärker kontrastierenden Lichteindruck empfangen. Ein faulendes Stück Holz würde, weil es mit eigenem Lichte zu leuchten vermag, unser Auge mehr zu fesseln als das schönste Menschenantlitz, denn jenes könnten wir sehen, dieses nicht.

Je weniger Unebenheiten eine Fläche zeigt, um so vollkommener wird auch von ihr das Licht zurückgeworfen. Die „von keinem Sturm empörte“ Oberfläche des Wassers heißt deshalb auch bezeichnend sein Spiegel. Aus ihm strahlte dem Menschen zuerst sein eigenes Bild entgegen, und mit dem Menschen freut sich die vom Dichter belebte Natur ihres Widerscheines.

> In dem glatten See
> Weiden ihr Antlitz
> Tausend Gestirne —

singen rühmend die Geister über dem Wasser, und von unten herauf „das feuchte Weib“:

> Labt sich die liebe Sonne nicht,
> Der Mond sich nicht im Meer?
> Kehrt wellenatmend ihr Gesicht
> Nicht doppelt schöner her?
> Lockt dich der tiefe Himmel nicht,
> Das feuchtverklärte Blau?
> Lockt dich dein eigen Angesicht
> Nicht her in ew'gen Tau?

Und wenn der Goethesche Fischer der geheimnisvoll lockenden Gewalt des spiegelnden Wassers nicht widerstehen kann, wie sollten wir es jungen Mädchen verdenken, daß sie bei keinem Spiegel vorbeigehen können, ohne mit einem rasch hineingeworfenen Blick sich ihrer anmutigen Erscheinung zu freuen?

Der **Spiegel** ist ein Gerät von universeller Bedeutung. Obwohl zu seiner Erfindung ein ziemlich hoher Grad von Naturbeobachtung, Nachdenken und mancherlei Kunstfertigkeit gehört, so finden wir ihn in verschiedenen Gestalten doch über die ganze Erde und selbst unter den am wenigsten kultivierten Völkern verbreitet. Bunte Glasperlen und kleine Handspiegel sind zwei der wirksamsten Kulturmittel rohen Naturvölkern gegenüber. Was Gold und alle Kunst nicht vermag, das vermögen diese der Eitelkeit angehängten Stachel — Annäherung, Zutrauen, Tausch, schließlich Gewöhnung an Arbeit, um sich die Mittel zur Befriedigung der wachsenden Bedürfnisse zu verschaffen.

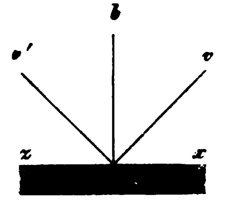
Und andererseits finden wir in den Gräbern der alten, auf so hoher Kulturstufe stehenden Griechen Spiegel, welche sie den gestorbenen Frauen als Symbol der Schönheit mitgaben.

Die Spiegel der Alten waren meist aus **Metall**, doch gab es auch schon frühzeitig solche aus **Glas**, die aus dem durch seine Glashütten berühmten Sidon bezogen wurden,

während die Metallspiegel aus Brindisi kamen. Gewöhnlich bestanden die letzteren aus einer Mischung von Kupfer und Zinn; Plinius erwähnt auch silberne Spiegel, und es wird bemerkt, daß Praxiteles solche um die Mitte des vierten Jahrhunderts vor Christi Geburt verfertigt habe. Mit Silberspiegeln von großen Dimensionen ist ein beträchtlicher Luxus getrieben worden, und in der üppigsten Zeit des Römertums hatten einzelne auch wohl Spiegel von Gold. Nero soll einen Spiegel von Smaragd besessen haben; vermutlich ist aber der Edelstein kein Spiegel, sondern ein durchsichtiges Glas gewesen, welcher vielleicht auf ähnliche Weise wie unsere Brillengläser geschliffen war; denn Nero bediente sich desselben, um in der Arena den Gladiatorenkämpfen zuzuschauen. Bergkrystall und andere durchsichtige Steine, auch Obsidian wurden zu Spiegeln verwendet.

Die antiken Spiegel sind meist klein, rund und oval, mit einer Handhabe, wie man deren heute noch hat; indessen besaßen nach Quintilius die Frauen auch große Specula totis paria corporibus, in denen sie ihre ganze Figur beschauen konnten, und Reiche hielten sich besondere Sklaven, die den Spiegel während des Gebrauchs halten mußten. Man kannte in sehr früher Zeit auch bereits die gekrümmten Spiegel, sowohl die Konvex- oder Zerstreuungs-, als die Konkav- oder Sammelspiegel (Hohlspiegel) und machte Anwendung davon.

Es mögen zunächst die Gesetze der Lichtbewegung bei der Reflexion von ebenen Spiegeln in Kürze betrachtet und dann einige wichtige und interessante Anwendungen behandelt werden.



350. Reflexion des Lichtes.

Reflexion des Lichts. Jeder Körper reflektiert Licht, der eine mehr, der andere weniger, am wenigsten die Gasarten, die uns deshalb auch unter gewöhnlichen Umständen häufig unsichtbar bleiben. Nehmen wir eine glatt polierte ebene Fläche von Metall (Abb. 350), einen **Planspiegel**, und lassen wir auf diese einen Lichtstrahl v auffallen. Die in dem Treffpunkte c auf dem Planspiegel errichtete Senkrechte cb heißt das **Einfallslot**, der Winkel, welchen der einfallende Strahl mit dem Einfallslote bildet, der **Einfallswinkel** und die durch v und bc bestimmte Ebene die **Einfallsebene**. Der Lichtstrahl wird nun so zurückgeworfen, daß er in der Einfallsebene bleibt, und daß er unter einem Winkel von dem Spiegel fortgeht, welcher genau so groß ist wie derjenige, unter welchem er auftraf: der Einfallswinkel vcb ist dem Reflexionswinkel bcv' gleich. Wenn man die Fenster eines Zimmers verschließt und nur eine kleine Öffnung läßt, durch welche die Sonne hereinscheint, so kann man dadurch, daß man die Sonnenstrahlen mit einer Spiegelscheibe auffängt und die von derselben reflektierten Strahlen beobachtet, sich von der Richtigkeit der ausgesprochenen Gesetze augenscheinlich überzeugen.

Bringen wir unser Auge in die Richtung des reflektierten Strahles, so empfangen wir den Lichteindruck, und wir sehen in der Richtung der in unser Auge fallenden Strahlen das Bild des lichtstrahlenden Körpers. Der Ort, an welchem das Spiegelbild auftritt, wechselt nicht, wenn wir auch mit den Augen hin und her gehen. Er ist ein ganz bestimmter und leicht durch den Versuch zu finden. Man suche nur die Richtungen der reflektierten Strahlen für verschiedene Stellungen des Auges; alle werden von einem Punkte herzukommen scheinen, der hinter der Spiegelfläche in der Verlängerung der Senkrechten liegt, die man von dem leuchtenden Körper auf sie ziehen kann; und zwar befindet sich jener Punkt genau so weit hinter der spiegelnden Fläche, als der leuchtende Körper vor derselben steht. Die Betrachtung der Abb. 351, welche dies Verhältnis der Entfernungen des wirklichen Körpers und seines Spiegelbildes von der spiegelnden Fläche wiedergibt, wird zugleich über den Umstand belehren, daß die Planspiegel das Bild symmetrisch (rechts und links vertauscht) zeigen müssen, ein Umstand, von welchem Holzschneider, Kupferstecher, Lithographen u. s. w. fortwährend bei ihren Arbeiten Gebrauch machen.

Unsere Spiegel werden gewöhnlich aus Glas hergestellt und auf der Rückseite mit einer glatten Metallschicht, Amalgam, versehen, um sie undurchsichtig zu machen. Die

Kunst, das Glas zu größeren Tafeln zu gießen, erfand Abraham Thevart im Jahre 1688 in Frankreich; Raimundus Lullus aber hat schon zu Ende des 14. Jahrhunderts das Verfahren beschrieben, wie man das Glas durch auf seine Rückseite gelegte Bleifolie zum Spiegel macht.

Geistererscheinung auf der Bühne. Obwohl undurchsichtige Körper am besten das Licht reflektieren, so gibt es doch Zwecke, für welche die Durchsichtigkeit der spiegelnden Flächen erwünscht ist. Ein solcher Fall trat uns schon bei dem Spiegel im Fizeauschen Apparat zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes entgegen, ein anderer ist auf vielen Bühnen in den Bereich schauspielerischer Thätigkeit gezogen worden. Die Methoden, „Geister erscheinen zu lassen", sind durch Anwendung dieser ziemlich einfachen Spiegelvorrichtung um die frappanteste vermehrt worden.

Es ist nicht unwahrscheinlich, daß schon die alten Zauberer ähnliche Spiegelvorrichtungen bei ihren Geisterbeschwörungen mitwirken ließen, wie sie bei dem gleich zu beschreibenden Apparate in Anwendung kommen. In größerem Maßstabe und vor der Öffentlichkeit wurde die Idee aber erst vor wenigen Jahren durch den englischen Physiker Pepper zur Ausführung gebracht, welcher lange Zeit allabendlich durch den sogenannten Pepper Ghost in dem Londoner Polytechnikum eine sehr große Zuschauermenge zum Schauern brachte und seiner patentierten Erfindung auch Eingang auf dem Theater verschaffte.



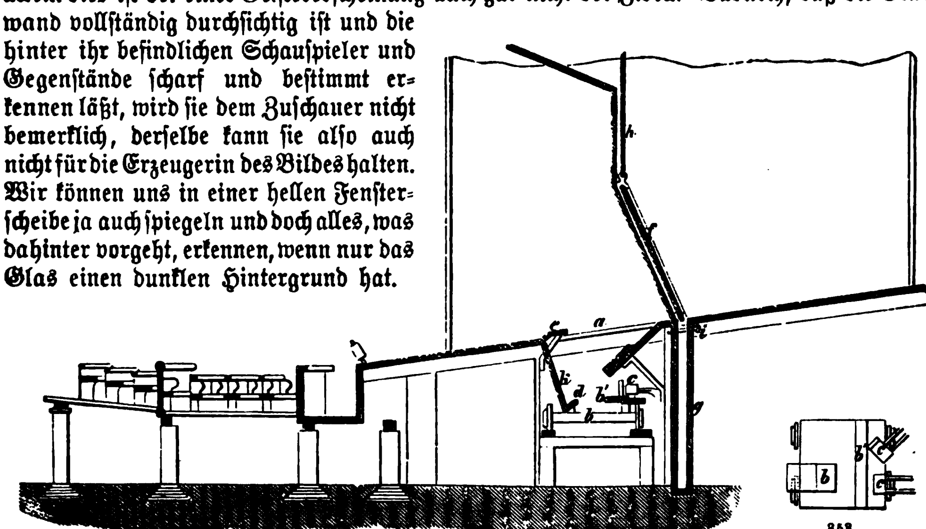
551. Spiegelbild bei Planspiegeln.

Versetzen wir uns in den Zuschauerraum eines großen Theaters. Es wird ein Stück gegeben, dessen Kern besonders auf der Erscheinung eines Geistes beruht. Die Katastrophe ist nahe. Die Lichter brennen matter und matter, das Haus ist ziemlich dunkel, die Bühne selbst sehr wenig beleuchtet; wir ahnen, daß der Zeitpunkt gekommen ist, wo etwas Großes passieren soll. Da erhebt sich an einer Stelle der Bühne ein heller Schein, er wird deutlicher und immer deutlicher, und es entwickeln sich allmählich in ihm sichtbare Konturen, die Bedeutung und Zusammenhang gewinnen — eine unbeschreibliche Gestalt steht plötzlich vor dem ergriffenen Helden der Tragödie. Er erkennt in ihr das Wesen eines längst Verstorbenen, und doch ist sie kein Körper, sie ist Luft; sie spricht, ihre Stimme klingt hohl, sie bewegt sich, und ihre Bewegungen werden durch keinerlei Gegenstände gehindert; sie geht durch Büsche und Bäume hindurch, ohne daß ein Blatt sich rührt; den umschlingenden Arm läßt sie ins Leere greifen, dem durchbohrenden Degen setzt sie keinen Widerstand entgegen. Endlich verschwindet sie ebenso plötzlich und geheimnisvoll vor unseren Augen, wie sie kam, und die Zuschauer können nicht umhin, dem Unglücklichen, welchem ihr Besuch gegolten, ihr tiefstes Mitgefühl zu schenken; denn fröstelnd fühlen sie, wie schrecklich es sein muß, in solcher Weise und durch solche Boten vielleicht an gewisse, bisher unbeachtet gelassene Verbindlichkeiten erinnert zu werden.

Wüßten sie während der Vorstellung schon, daß, sobald der Vorhang gefallen ist, der von ihnen Bemitleidete Arm in Arm mit dem Geiste seines Vaters oder eines erstochenen Nebenbuhlers in ein Weinhaus geht — sie würden sich einen großen Teil Rührung ersparen. Schließlich erzählt er ihnen, daß er von der ganzen Erscheinung selbst gar nichts gesehen habe. Das kommt ihnen nun freilich am allermerkwürdigsten vor. Sie forschen und fragen, und richtig, die Zuschauer allein sind die Getäuschten. Aber wie?

Das Theater hat außer der gewöhnlichen Bühne noch eine zweite, verborgene, die etwas tiefer liegt. Auf ihr spielt der Schauspieler, welcher dem auf der gewöhnlichen

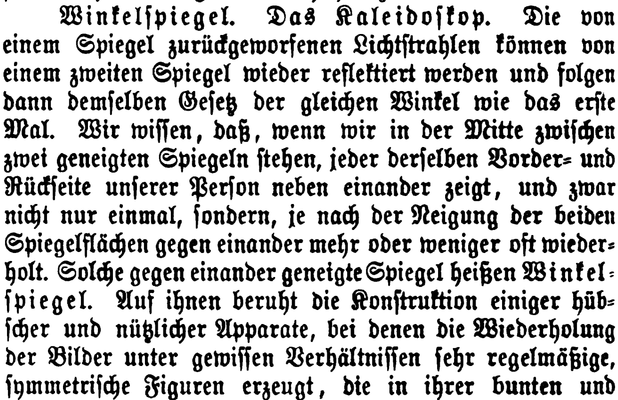
Bühne befindlichen Akteur als Geist erscheinen soll, und sie ist deshalb dem Zuschauer durch gewisse Arrangements, Gebüsch oder eine Bodenerhöhung verdeckt. Das Wesentliche der ganzen Einrichtung besteht aber in einer großen, gut polierten Glaswand, welche gegen den Zuschauerraum etwas geneigt und so aufgestellt ist, daß die verborgene Bühne zwischen ihr und den Zuschauern liegt. Um ein genaueres Verständnis des ganzen Apparates zu geben, verweisen wir auf die Abb. 352, welche die Einrichtung, wie sie von Dirks und Pepper an vielen Bühnen ausgeführt worden ist, im Durchschnitt gibt. Die Öffnung a, welche zu der verborgenen Bühne b führt, kann durch Fallthüren geschlossen werden, damit sich die Schauspieler, wenn der Geist nicht mitzuwirken hat, ungehindert auf der oberen Bühne bewegen können; f ist die Glaswand, deren Ränder oder Zusammenfügungsstellen auf irgend eine Weise durch Rahmen, Guirlanden oder dergleichen maskiert sind. Sie wirkt wie ein Spiegel, zwar nicht mit der ganzen Schärfe und Deutlichkeit, welche eine hinten mit Zinnfolie belegte Spiegelplatte ihren Bildern geben würde; allein dies ist bei einer Geistererscheinung auch gar nicht der Zweck. Dadurch, daß die Glaswand vollständig durchsichtig ist und die hinter ihr befindlichen Schauspieler und Gegenstände scharf und bestimmt erkennen läßt, wird sie dem Zuschauer nicht bemerklich, derselbe kann sie also auch nicht für die Erzeugerin des Bildes halten. Wir können uns in einer hellen Fensterscheibe ja auch spiegeln und doch alles, was dahinter vorgeht, erkennen, wenn nur das Glas einen dunklen Hintergrund hat.



352. Apparat zur Erzeugung von Geistererscheinungen auf der Bühne. 353.

Um den gewünschten Zweck nun zu erreichen, muß die obere Bühne während der Katastrophe verfinstert werden. Der Geist selbst wird von der unteren Bühne b aus dargestellt. Hier befindet sich eine Wand k, an welche der entsprechend gekleidete Schauspieler sich anlehnen kann. Das Bild desselben wird, da der ganze untere Raum mit schwarzem Sammet ausgeschlagen ist, bei der hellen Beleuchtung sehr deutlich hervortretend den Zuschauern durch die Glaswand widergespiegelt, und dies Spiegelbild ist eben der Geist. Er scheint, aus dem Zuschauerraume gesehen, hinter der unsichtbaren Glasscheibe sich zu befinden; der mit ihm verkehrende Schauspieler, der ebenfalls hinter f sich bewegt, muß genau den Punkt des Spiegelbildes kennen, weil er natürlich von der Erscheinung nichts sehen kann, aber sein Spiel doch nach den Bewegungen derselben einzurichten hat. Die Wand k ist, damit die Figur im Bilde aufrecht erscheint, der Spiegelscheibe f genau parallel gerichtet. Die letztere selbst befindet sich in einem beweglichen Rahmen, den man durch Schrauben oder Seile h und i unter dem richtigen Winkel einstellen kann. Die Einstellung geschieht entweder während des Zwischenaktes oder bei offener Szene zu einer Zeit, in der die Aufmerksamkeit des Publikums anderweitig gefesselt ist. Selbstverständlich muß man in diesem Falle den richtigen Neigungswinkel vorher genau ermittelt haben. Da nun der Geisterspieler wegen der Neigung der Spiegelplatte auch in seinem Versteck eine schiefe Lage einnehmen muß, welche jede Bewegung erschweren würde, so ist die Wand k wie ein Wagen auf Rollen und Schienen verschiebbar ein=

gerichtet. Die Lichtquelle c (s. Abb. 352 u. 353) bewegt sich zugleich mit dem Wagen, wofern sie nicht so eingerichtet ist, daß sie den ganzen unteren Raum, innerhalb dessen die Gestalt gestikuliert, erleuchtet. Hat man eine konstante Lichtquelle, wie elektrisches Licht, so kann man die Beleuchtung durch einen Schirm unterbrechen, welcher in gewisser Stellung die Bestrahlung von der verborgenen Bühne abschneidet. Bei Hydro-Oxygengaslicht ist die Abschwächung und Verstärkung der Helligkeit am bequemsten durch Stellung der Gashähne zu bewirken.





354. Das Kaleidoskop.

Winkelspiegel. Das Kaleidoskop. Die von einem Spiegel zurückgeworfenen Lichtstrahlen können von einem zweiten Spiegel wieder reflektiert werden und folgen dann demselben Gesetz der gleichen Winkel wie das erste Mal. Wir wissen, daß, wenn wir in der Mitte zwischen zwei geneigten Spiegeln stehen, jeder derselben Vorder- und Rückseite unserer Person neben einander zeigt, und zwar nicht nur einmal, sondern, je nach der Neigung der beiden Spiegelflächen gegen einander mehr oder weniger oft wiederholt. Solche gegen einander geneigte Spiegel heißen Winkelspiegel. Auf ihnen beruht die Konstruktion einiger hübscher und nützlicher Apparate, bei denen die Wiederholung der Bilder unter gewissen Verhältnissen sehr regelmäßige, symmetrische Figuren erzeugt, die in ihrer bunten und wechselnden Mannigfaltigkeit dem Musterzeichner manchen nützlichen Anhalt geben können.

Schon mit einer Vorrichtung, die man auf die einfache Weise dadurch herstellen kann, daß man zwei kleine viereckige Spiegel unter einem gewissen Winkel zusammenstoßen läßt, kann man schöne Effekte erlangen, wenn man den Winkel genau so groß macht, daß er in den Umfang des Kreises ohne Rest aufgeht. Je nachdem er $^1/_4$, $^1/_5$, $^1/_6$ u. s. w. des Kreises beträgt, ordnen sich die Bilder der zwischen den Spiegeln befindlichen Gegenstände, Zeichnungen oder dergleichen zu vier-, fünf-, sechs- und mehrstrahligen Sternen. Das regelloseste Gewirr bunter Fäden, Perlen, Tintenkleckse, Blumenblätter, Glasstücke, kurz was es auch immer sei, erhält dadurch eine schöne Regelmäßigkeit, welche die bewundernswürdigsten Figuren hervorbringt. Vor einigen Jahren wurde ein Apparat unter dem Namen Debuskop (nach dem Verfertiger desselben, Debus) in den Zeitungen ausposaunt und wird auch jetzt noch zu ziemlich hohem Preise verkauft. Derselbe ist aber nichts weiter als ein ganz einfacher Winkelspiegel, den sich jeder, der einen solchen zu seinem Nutzen oder Vergnügen haben möchte, selbst aus zwei kleinen Spiegelscheiben, oder noch besser aus zwei blank polierten, versilberten Kupferplatten anfertigen kann. Und zwar bietet diese eigene Anfertigung noch den Vorteil, daß man dann die Spiegelplatten verstellbar einrichten und so nach Belieben fünf-, sechs- oder mehreckige Bilder erzeugen kann, während bei dem „patentierten“ Debuskop die Spiegel sich gegen einander in fester, unverrückbarer Stellung befanden.



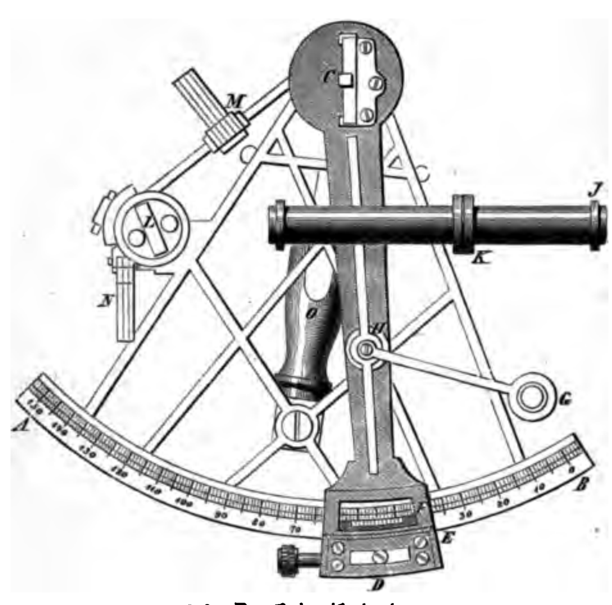
355. Bild im Kaleidoskop.

Das Kaleidoskop (deutsch: das, was schöne Bilder zeigt, Abb. 354 u. 355) ist eine 1817 von Brewster in den Handel gebrachte Erfindung, bei welcher bald zwei, bald drei Spiegel unter Winkeln von 60 Grad zusammenstoßen. In dem dadurch ge-

bildeten Dreieck liegen ebenfalls lauter kleine farbige Gegenstände, deren Spiegelbilder sich zu regelmäßigen sechseckigen Figuren zusammensetzen (Abb. 355), die sich durch Schütteln oder Drehen fortwährend verändern lassen. Ähnliche Vorrichtungen wie das Kaleidoskop waren schon vor mehreren Jahrhunderten bekannt. Porta und der Pater Kircher (um 1646) erwähnen ihrer, ohne daß sie jedoch so großes Aufsehen gemacht hätten, wie die Brewstersche Erfindung, welche von Paris aus, wo sie ein Modespielzeug wurde, sich rasch über die ganze Welt verbreitete und ihrem Erfinder großen Gewinn brachte. Eine Zeit lang wurden in Paris täglich gegen 60000 Stück von verschiedenen Größen gefertigt.

Von dem Prinzip des Winkelspiegels findet man in Kaufläden behufs dekorativer Gruppierung der in den Schaufenstern derselben ausgelegten Gegenstände mannigfachen Gebrauch gemacht.

Die wichtigste Anwendung von der Spiegelung ebener Flächen ist aber bei der Herstellung einiger wissenschaftlicher Instrumente gemacht worden, unter denen namentlich der Spiegelsextant, das Reflexionsgoniometer, der Heliostat und der Heliotrop zu nennen sind.



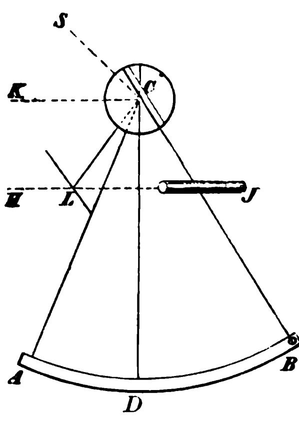
356. Der Spiegelsextant.

Der **Spiegelsextant** dient dazu, den Winkel zu bestimmen, welchen die vom Beobachter aus nach zwei entfernten Punkten gezogenen Geraden mit einander bilden. Er verdankt seinen Namen einer sehr gebräuchlichen Einrichtung, nach welcher bei diesem Instrument ein Sechstelkreis zur Messung der Winkelgrößen angewandt wurde. Die erste Idee dazu stammt von dem bekannten englischen Physiker **Hooke**; **Newton** hat dieselbe vervollkommnet und **Hadley** 1731 danach das erste Instrument der Art ausgeführt. In der That war dasselbe aber ein Oktant, denn es betrug sein Bogen nur den achten Teil eines Kreisumfanges.

In Abb. 356 soll AB einen geteilten Kreisbogen bezeichnen, um dessen Mittelpunkt C sich der Arm (Alhidade) CD drehen läßt. Derselbe trägt an seinem oberen Ende einen zur Ebene des Kreisbogens senkrechten Planspiegel C, der mittels kleiner Schrauben regulierbar befestigt ist. An dem anderen Ende des Armes befindet sich ein Nonius, welcher die Größe der ausgeführten Drehung des Armes, je nach der Feinheit des geteilten Kreises, in Graden resp. Minuten, Sekunden und Bruchteilen derselben abzulesen gestattet. G ist eine kleine Lupe, die, an einem um H drehbaren Stäbchen befestigt, die feine Teilung besser erkennen läßt. J ist ein Fernrohr mit fester, unveränderlicher Richtung, deshalb auch in eine feste Fassung K eingeschraubt. Daselbe ist auf einen zweiten, zur Kreisebene senkrechten, **festen** Planspiegel L gerichtet, dessen untere Hälfte auf der Rückseite mit Zinnfolie belegt, und dessen obere Hälfte durchsichtig ist, so daß man mit Hilfe des Fernrohrs durch den oberen Teil desselben einen entfernten Gegenstand direkt und gleichzeitig das vom ersten Spiegel C und vom unteren Teile des zweiten Spiegels L **zweimal reflektierte** Bild eines zweiten entfernten Gegenstandes beobachten kann. Wenn der feststehende Spiegel L mit dem drehbaren bei C genau parallel gestellt ist, so koinzidiert der Nullpunkt des Nonius mit dem Nullpunkt der Kreisteilung. M und N sind zwei

Blendgläser, um, wenn Sonnenbeobachtungen gemacht werden sollen, den zu grellen Schein des Lichtes abzudämpfen; O stellt den Handgriff dar, an welchem das Instrument beim Gebrauche gehalten wird. In der Abb. 357 sehen wir alle diese Teile in einfacher, schematischer Darstellung, welche gewählt worden ist, um die Wirkungsweise besser zu versinnbildlichen.

Sind die beiden Spiegel C und L parallel gerichtet, so werden die Strahlen, welche von Spiegel C reflektiert nach Spiegel L gelangen, von diesem wieder in derselben Richtung in das Fernrohr zurückgeworfen, in welcher sie auf den Spiegel C auftrafen. Man sieht also mit Hilfe des Fernrohrs J denselben Gegenstand, das eine Mal durch die obere Hälfte des Spiegels L direkt, das andere Mal das zweimal reflektierte Bild desselben in dem Spiegel selbst. Man hat demnach in der Übereinstimmung, in der Deckung der beiden Bilder ein sicheres Mittel, den Parallelismus der Spiegel auf das genaueste herzustellen. In dieser Stellung soll also, wie erwähnt, der Index des Armes CD auf den Nullpunkt der Teilung einspielen. Ist der Winkel zu bestimmen, unter welchem zwei Punkte K und S von dem Standpunkte des Beschauers aus erscheinen, so visiert man mit dem Fernrohr (Abb. 357) durch den unbelegten, oberen Teil des Spiegels L hinweg nach dem einen Punkte K und bringt gleichzeitig das Bild des anderen, in der Richtung CS liegenden Punktes in das Fernrohr, indem man mittels der Alhidade CD den Spiegel C so weit dreht, bis er den gesuchten Gegenstand nach Spiegel L reflektiert, und dieser das Bild in das Fernrohr J weiter sendet, so daß der direkt gesehene Punkt K sich mit dem zweimal reflektierten Bilde von S deckt. Der Winkel, um welchen man hierbei den Arm CD hat drehen müssen, ist genau die Hälfte desjenigen, den die vom Beobachter aus nach den beiden Punkten gezogenen Richtungslinien mit einander bilden; um diesen Winkel gleich direkt ablesen zu können, ist die Teilung so ausgeführt, daß ein Grad derselben einem halben Grade der gewöhnlichen Kreisteilung entspricht.



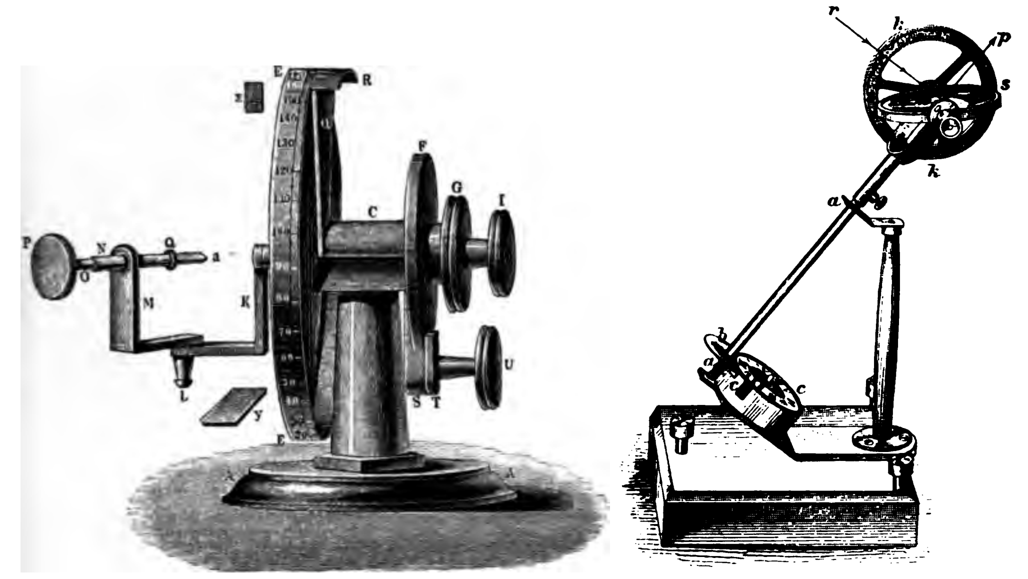
357. Prinzip des Sextanten.

Der Sextant ist für die Seefahrer ein unentbehrliches Instrument; sein Hauptvorzug beruht darauf, daß er in der freien Hand gehalten ohne festen Standpunkt die Winkelgröße mit hinlänglicher Genauigkeit zu bestimmen gestattet, und daß die Genauigkeit der Winkelmessung durch geringe Schwankungen des Schiffes nicht beeinträchtigt wird. Für die astronomische Ortsbestimmung, namentlich für die Breitenbestimmung, ist es notwendig, die Sonnenhöhe zu nehmen, d. h. den Winkel, um welchen die Sonne beim Durchgang durch den Meridian über dem Horizont steht, genau zu messen. Jede Methode, welche einen feststehenden Apparat zu dieser Messung, die an sich nicht besonders schwierig ist, verlangt, würde von vornherein bei dem häufigen Schwanken des Schiffes unbrauchbar sein. Der Sextant ist dasjenige Instrument, welches an dieser Bewegung, unbeschadet der Genauigkeit seiner Angaben, mit teilnehmen kann und deshalb auf keinem Schiffe fehlt, welches das offene Wasser befährt.

Das Reflexionsgoniometer ist ein von Wollaston erfundenes Instrument, um die Winkel, unter welchen die Flächen der Krystalle zusammenstoßen, zu messen. Es wird zu diesem Zwecke die Spiegelung der Krystallflächen benutzt, welche dieselben entweder von Natur besitzen, oder die man ihnen durch Benetzen oder Aufkleben dünner Plättchen von Spiegelglas geben kann. Das Prinzip ist sehr einfach. Man bringt den Krystall in der Achse eines vertikalen, auf seinem Umfange mit Teilung versehenen und mit der Achse drehbaren Kreises an, so daß die Kante, in welcher die beiden Krystallflächen zusammenstoßen, in die Verlängerung jener Achse fällt. Man beobachtet nun von einer entfernten, horizontalen Marke, etwa einer Dachfirst, das Spiegelbild, welches eine der beiden Flächen liefert, bringt es mit einer passend gewählten, direkt zu beobachtenden, horizontalen Stand-

linie zur Deckung und liest so die Stellung des Krystalls mittels eines mit der Drehungsachse des Instrumentes fest verbundenen Index an der Kreisteilung ab. Hierauf dreht man den Kreis mit dem Krystall um die Drehungsachse des Instruments so lange, bis dieselbe Erscheinung auch für die zweite Krystallfläche stattfindet, bis also auch das von der zweiten Fläche reflektierte Bild der horizontalen Marke mit der horizontalen Standlinie koinzidiert, und liest wieder die Stellung des Index an der Kreisteilung ab; alsdann ergibt die Differenz der beiden Kreisablesungen den Supplementwinkel des zu messenden Krystallwinkels, d. h. denjenigen Winkel, welcher den zu messenden Krystallwinkel zu 180 Grad ergänzt.

Abb. 358 stellt ein einfaches Wollastonsches Reflexionsgoniometer dar. PQa bildet den ausziehbaren und um L drehbaren Krystallhalter, welcher, wenn F durch die Klemmbacke UST festgestellt ist, durch den Limbus I gedreht werden kann; E ist der vertikale Teilkreis, welcher sich bei gelüfteter Klemmbacke UST samt dem Krystallhalter mittels des Limbus G um die durch seinen Mittelpunkt gehende, horizontale Achse drehen



358. Reflexionsgoniometer.

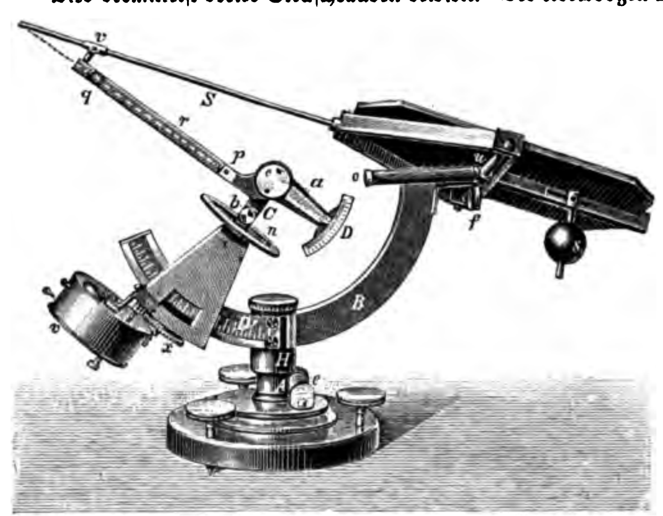
359. Heliostat von Meyerstein.

läßt, und dessen Stellung durch den auf QR befindlichen Index abgelesen werden kann. x stellt die horizontale Marke dar und y einen Spiegel, welcher bei passender Neigung das Spiegelbild von x als horizontale Standlinie liefert.

Bei vielen optischen Untersuchungen ist es notwendig, Sonnenstrahlen längere Zeit hindurch stets in derselben Richtung in das Beobachtungszimmer, resp. auf die Apparate gelangen lassen zu können. Diesem Zwecke dient eine sehr sinnreiche Spiegelvorrichtung, der **Heliostat**. Seine Einrichtung wird dadurch eine komplizierte, daß die Sonne nicht stillsteht, sondern ihre scheinbare Bahn am Himmelsgewölbe beschreibt, der Spiegel also fortwährend der Bewegung der Sonne folgen muß. Das Wesentliche des Instrumentes besteht daher nicht in dem Spiegel, sondern vielmehr in dem Uhrwerke, welches die Drehung desselben bewirkt. In Abb. 359 ist ein übersichtlicher, von Meyerstein konstruierter Heliostat in $^1/_3$ der natürlichen Größe abgebildet. Das Instrument ist so aufzustellen, daß die Achse aa der Weltachse parallel, also nach dem Polarstern gerichtet ist. Am unteren Ende der Achse befindet sich ein Zahnrad b, welches durch das Uhrwerk cc in 24 Stunden einmal um seine Achse gedreht wird. Auf das obere Ende der Achse aa ist eine mittels einer Klemmschraube festzustellende Hülse aufgeschoben,

welche eine halbkreisförmige Gabel trägt, zwischen deren Enden der eigentliche Heliostatenspiegel ss derart angebracht ist, daß er um eine horizontale, zur Achse aa senkrechte Achse gedreht und in jeder Neigung zur letzteren festgestellt werden kann. Er ist so einzustellen, daß der einfallende Strahl ro nach op, der Verlängerung der Achse aa, reflektiert wird, so daß also der reflektierte Strahl, mit der Weltachse zusammenfallend, nach dem Polarstern gerichtet ist. Zu diesem Zwecke muß die Spiegelebene mit Hilfe des geteilten Kreises kk gegen die Weltachse um einen Winkel geneigt werden, welcher gleich $90^0 - \frac{1}{2}\varphi$ ist, wo φ die geographische Breite des Beobachtungsortes ist. In diesem Falle wird der reflektierte Lichtstrahl, da die der Weltachse parallele Achse aa durch das Uhrwerk mit derselben Winkelgeschwindigkeit gedreht wird, mit welcher die Sonne sich scheinbar um die Weltachse dreht, stets mit der Richtung der Weltachse zusammenfallen. Mit Hilfe eines zweiten Spiegels kann man nun den Lichtstrahl in unveränderter, horizontaler Richtung in das Zimmer resp., auf die optischen Apparate gelangen lassen. Gambey und Silbermann, in neuerer Zeit Fueß haben vervollkommnetere Uhrheliostaten mit nur einem Spiegel konstruiert. In Abb. 360 ist ein kleiner Fueßscher Heliostat neuester Konstruktion dargestellt.

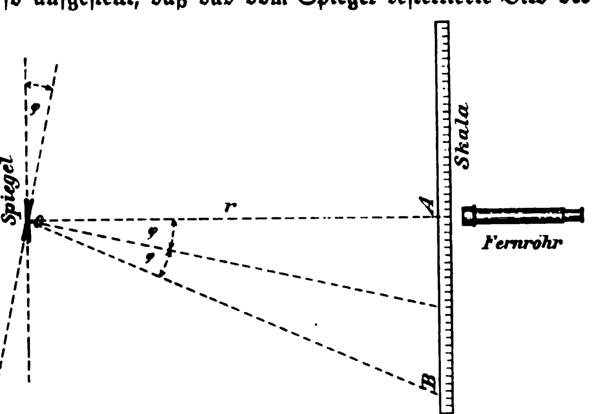
Die senkrechte Stellung der Azimutachse A, an welcher eine Röhrenlibelle angebracht ist, wird vermittelst dreier Stellschrauben bewirkt. Der Kreisbogen D' ist mit Gradteilung versehen und trägt einen Schieber, in welchem die Stundenachse gelagert ist. Am unteren Ende des Schiebers ist das Uhrwerk v befestigt. Das Zahnrad x bewirkt die Verbindung der Stundenachse mit dem herausragenden Trieb des Uhrwerkes v. Auf dem oberen Teile der mit der Schraube b festklemmbaren Stundenachse sitzt der Träger C des Deklinationsbogens D, welcher, während die Stundenachse durch das Zahnrad in bestimmter Stellung gehalten wird, beliebig gedreht und festgestellt werden kann. Den Träger C umschließt ein Gabelstück r, welches am linksliegenden, längeren Arme zwei kleine Winkelstücke, die Diopter p und q trägt. Der kurze, rechts liegende Arm endigt in einer Strichmarke, welche den Deklinationsbogen D bestreicht und zur Einstellung des Deklinationswinkels der Sonne dient. Der Bogenarm B hält die Buchse der Spiegelachse o und ist mittels seiner Hülse H seitlich drehbar eingerichtet, um den reflektierten Sonnenstrahl beliebig seitwärts in der Ebene der Horizontalen ablenken zu können. u ist ein senkrecht zur Spiegelachse stehender Arm, mit welchem vermittelst Spitzengelenks die Fassung des Spiegels verbunden ist, S die Führungsstange des Spiegels, welcher leicht verschiebbar in der ebenfalls nach allen Richtungen beweglichen Hülse v gleitet.



360. Fueß'scher Heliostat.

Der Heliotrop ist eine Spiegelvorrichtung, um das Sonnenlicht bis auf sehr entfernte Punkte zu reflektieren. Da nämlich eine Quadratzoll große Spiegelfläche, wenn sie hell von der Sonne beschienen wird, bis auf mehr als sieben Meilen Entfernung noch durch ein Fernrohr sichtbar ist, so können dergleichen Lichtsignale mit großem Nutzen bei Ländervermessungen angewendet werden. Es ist nur notwendig, mittels geeigneter Justierungsvorrichtungen dafür zu sorgen, daß der vom Spiegel reflektierte Lichtstrahl in die optische Achse des auf der anderen Station aufgestellten Beobachtungsfernrohrs fällt. Der von Gauß erfundene Heliotrop läßt diesen Zweck auf höchst scharfsinnig erdachte Weise erreichen. Steinheil in München hat ein anderes Instrument angegeben, das sich durch größere Einfachheit auszeichnet.

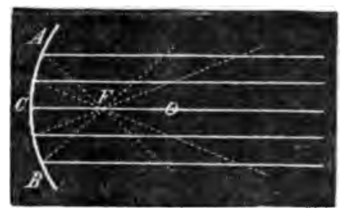
Eine weitere wichtige, besonders bei den feineren magnetischen und elektrischen Meßinstrumenten vorkommende Anwendung der Reflexionsgesetze an ebenen Spiegeln ist die Gauß-Poggendorffsche Spiegelablesungsmethode mittels Fernrohr und Skale zur Messung kleiner Drehungswinkel. Der in der Regel an einem feinen Faden aufgehängte Magnet ist für diesen Zweck mit einem Planspiegel derart verbunden, daß die Ebene des Spiegels vertikal ist, und seine Mitte in die Drehungsachse des Magnets fällt. In der zur Spiegelebene normalen Richtung ist in bestimmter Entfernung (Abb. 361) eine gut beleuchtete (Millimeter-) Skale und ober- oder unterhalb derselben ein mit Fadenkreuz versehenes Fernrohr so aufgestellt, daß das vom Spiegel reflektierte Bild der Skale im Gesichtsfelde des Fernrohres erscheint, und zwar der mittelste Strich A der Skale (der als Nullpunkt dient) mit dem Vertikalfaden des Fadenkreuzes koinzidiert. Erfährt alsdann der Magnet und mit ihm also auch der Spiegel durch irgend eine äußere Ursache, z. B. durch einen anderen Magnet, oder durch einen nahe vorbeigeführten galvanischen Strom, eine kleine Drehung φ, so wird ein anderer Skalenteil, etwa B, im Gesichtsfelde des Fernrohres erscheinen. Aus der Entfernung dieses von dem ersteren (n) sowie aus der senkrechten Entfernung der Skale vom Spiegel (r) — beide mit derselben Einheit gemessen — läßt sich leicht die Größe des Drehungswinkels berechnen ($\varphi = \frac{n}{2r}$).



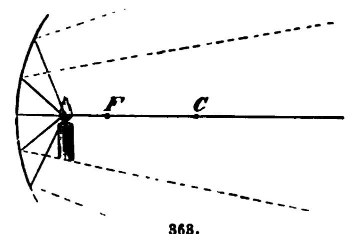
361. Gauß-Poggendorffsche Spiegelablesung.

Auf die verschiedenen Spiegelvorrichtungen, welche in neuerer Zeit benutzt werden, um innere Körperteile zu beleuchten und zu beobachten, kann hier nur kurz hingewiesen werden; die mannigfachen Augen-, Ohren-, Kehlkopfspiegel u. s. w. sind meist Hohlspiegel, welche Licht auf die betreffenden Körperteile werfen und eine kleine Öffnung zum gleichzeitigen Hindurchsehen besitzen.

Spiegelung gekrümmter Flächen. Wenn ein Lichtstrahl auf eine gekrümmte spiegelnde Fläche auffällt, so wird er nach demselben Gesetze, wie beim ebenen Spiegel reflektiert. Der Einfallswinkel ist dem Reflexionswinkel gleich; wir haben uns nur in dem Punkte, in welchem der Strahl auftrifft, die Tangentialebene an die Fläche zu denken, um die Wahrheit dieses Satzes bestätigt zu sehen. Die gekrümmten Flächen sind



362. Zurückwerfung parallel auffallender Strahlen durch den Hohlspiegel.

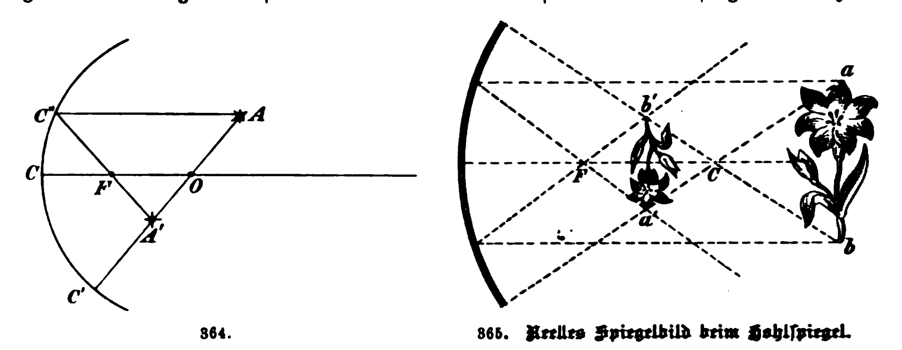


363. Reflexion in divergierender Richtung.

zweierlei Art, erhabene und hohle oder, wie sie in der Sprache der Physiker genannt werden, konvexe und konkave. Ein Uhrglas zeigt uns auf seiner äußeren Oberfläche ein Beispiel der ersten, auf seiner inneren ein Beispiel der zweiten Art. Da nun aber die Natur der Krümmung eine sehr verschiedene sein kann, indem es cylindrische, kegelförmige, kugelförmige, ellipsoidische, parabolische u. s. w. Oberflächen gibt, so werden die

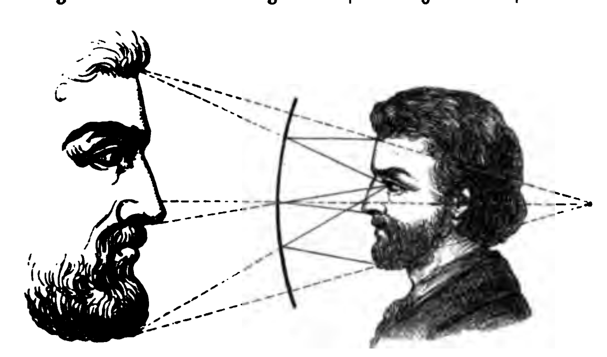
von solchen Spiegeln erzeugten Spiegelbilder trotz des einfachen Grundgesetzes, nach welchem sie zustandekommen, eine große Mannigfaltigkeit und eine mehr oder weniger verzerrte Gestalt zeigen.

Bei **Hohlspiegeln** vereinigen sich unter gewissen Verhältnissen alle von ihnen reflektierten Strahlen in einem einzigen Punkte F, dem **Brennpunkte** (Focus). Ist die spiegelnde Fläche, wie AB in Abb. 362, ein Teil einer Hohlkugelfläche, und die Lichtquelle so weit entfernt, daß die von ihr ausgehenden Strahlen unter sich als parallel gelten können, so liegt dieser Brennpunkt in der **Achse des Spiegels**, das ist in der Verbindungslinie des Kugelmittelpunktes O mit dem Mittelpunkt C des Spiegels und zwar in



364. 365. Reelles Spiegelbild beim Hohlspiegel.

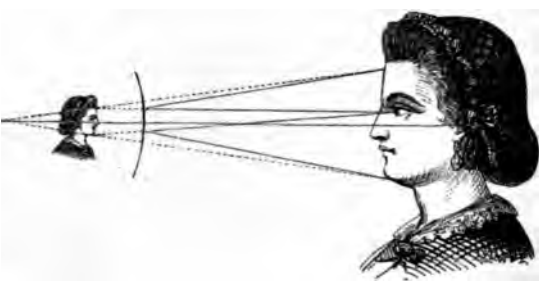
der Mitte zwischen O und C (**Hauptstrahl**). Die Entfernung FC des Brennpunktes von der Mitte der Spiegelfläche in dieser Richtung heißt die **Brennweite** des Spiegels. Rückt die Lichtquelle näher an den Spiegel, so daß die von ihr ausgehenden Strahlen unter einander nicht mehr parallel sind, so rückt der Brennpunkt weiter vom Spiegel ab, dem Kugel- oder Krümmungsmittelpunkte zu und fällt endlich mit diesem zusammen, wenn die Lichtquelle in dem Krümmungsmittelpunkte selbst sich befindet. Kommt letztere noch näher an den Spiegel heran, so rückt der Brennpunkt immer weiter ab, und zwar unendlich weit, wenn die Lichtquelle im Brennpunkte F steht; die reflektierten Strahlen gehen dann parallel fort; sie divergieren endlich sogar, wenn der leuchtende Punkt zwischen Brennpunkt und Spiegelfläche liegt (Abb. 363).



366. Virtuelles Bild beim Konkavspiegel.

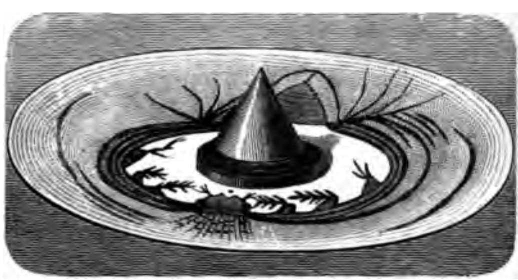
Die von einem Hohlspiegel erzeugten **Spiegelbilder** sind mannigfacher Art und werden durch folgende einfache Konstruktion erhalten: Es sei A (Abb. 364) ein leuchtender Punkt, dessen Spiegelbild gesucht wird. Unter allen Strahlen, welche von A ausgehend auf den Spiegel fallen, sind zwei ausgezeichnet, der **Zentralstrahl** AOC', welcher durch den Krümmungsmittelpunkt geht, und der **Parallelstrahl** AC''; der erstere wird, da er normal auf die Spiegelfläche fällt, in sich selbst reflektiert, der zweite so, daß er durch den Brennpunkt geht; derjenige Punkt, in welchem sich die beiden reflektierten Strahlen C'O und C''F schneiden, nämlich A', ist daher der **Bildpunkt** von A. Indem man auf diese Weise mit den einzelnen Punkten eines leuchtenden Gegenstandes verfährt, erhält man das vom Hohlspiegel reflektierte Bild desselben. Liegt der leuchtende Gegenstand über den Krümmungsmittelpunkt hinaus, wie z. B. ab in Abb. 365, so erhält man mittels dieser Konstruktion a' als Spiegelbild des Punktes a, und ebenso erhält man b' als Spiegelbild von b. Man erhält, wenn man auf diese Weise mit allen

zwischen a und b liegenden Punkten verfährt, ein Spiegelbild, welches umgekehrt und verkleinert erscheint. Bild und Gegenstand lassen sich bezüglich ihrer Wirkungsweise vertauschen. Würde sich nämlich der leuchtende Gegenstand zwischen dem Krümmungsmittelpunkte C und dem Brennpunkte F befinden, würde also a' b' der leuchtende Gegenstand sein, so würde man in eben derselben Weise als Spiegelbild ein umgekehrtes und vergrößertes Bild (a b) erhalten. Man kann es auf einer mattgeschliffenen Glasscheibe auffangen, und es heißt deswegen das reelle Bild im Gegensatz zu dem virtuellen Bilde, welches nicht in Wirklichkeit existiert, sondern nur in unserem Auge erzeugt wird, wenn der leuchtende Gegenstand zwischen dem Brennpunkte und der Spiegelfläche liegt. Der Gang der Lichtstrahlen für den letzteren Fall ist in Abb. 366 angegeben; in dem bekannten vergrößernden Rasierspiegel haben wir einen Apparat, der uns diese Art Bilder auf das deutlichste vor Augen führt. Das virtuelle Bild erscheint hinter dem Spiegel und zwar aufrecht stehend und vergrößert.

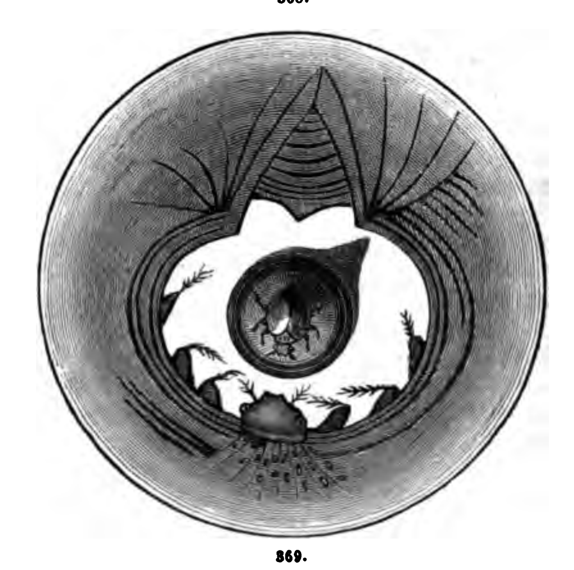


367. Virtuelles Bild beim Konvexspiegel.

Die konvexen Spiegel geben keine reellen Bilder; die von ihnen reflektierten Strahlen divergieren nach allen Seiten. Die virtuellen Bilder aber erscheinen aufrecht und je nach der Krümmung des Spiegels und der Entfernung des leuchtenden Gegenstandes mehr oder weniger verkleinert. Die großen, inwendig entweder geschwärzten oder versilberten Kugeln, welche man zum Zierat in den Gärten aufstellt, eignen sich zu Beobachtungen dieser Art, und die beigegebene Abb. 367 dürfte, wenn man das in Bezug auf Hohlspiegel Gesagte hier in entsprechender Weise zur Anwendung bringt, die Wirkungsweise eines Konvexspiegels genügend erläutern.



368.



369.

368 u. 369. Verzerrte Bilder im konischen Spiegel.

Dies sind die einfachsten Fälle der Anwendung gekrümmter Spiegel. Die komplizierteren Erscheinungen, welche uns in mannigfaltiger Weise in der Natur gegenübertreten, lassen sich alle nach den hier entwickelten Gesetzen erklären. Eine irgendwie wichtige Anwendung wird aber mit Ausnahme der elliptischen und parabolischen Spiegel, welche zu Beleuchtungszwecken benutzt werden, von ihnen nicht gemacht. Weder die verzerrten Bilder, welche, in polierten Kegel- oder Cylinderspiegeln betrachtet, als regelmäßige Figuren erscheinen, und welche man als Kuriositäten noch vielfach in alten Sammlungen vor-

findet (Abb. 368 und 369), noch die freischwebenden Bilder der Hohlspiegel, die, auf Rauchwolken oder Vorhängen aufgefangen, bei den Geistercitationen in früherer Zeit eine große Rolle gespielt haben mögen, können unser Interesse noch besonders in Anspruch nehmen. Bei einer sehr wichtigen Form des Fernrohrs aber, nämlich dem Spiegelteleskop, sowie bei einigen anderen Apparaten, in denen sphärische Spiegel eine Rolle spielen, werden wir noch Gelegenheit finden, uns der soeben behandelten Sätze wieder zu erinnern.

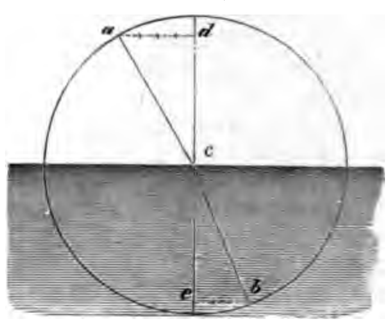
Das Prisma und die Spektralanalyse.

Mythisches. Brechung des Lichtes, im Wasser und in der Luft. Fata morgana. Das Prisma. Totale Reflexion. Die Camera lucida. Abbes Refraktometer. Das Sonnenspektrum. Zerlegung des weißen Lichtes in farbige Strahlen. Ton und Farbe. Newtons Farbenlehre und Goethe. Fluoreszenz. Fraunhofersche Linien. Verschiedenheit der Spektra von verschiedenen Lichtquellen. Kontinuierliche Spektra und Spektra der Gase und Dämpfe. Geschichte der Spektralanalyse. Kirchhoff und Bunsen. Spektralapparate. Erzeugung von Spektra durch Diffraktionsgitter. Neuentdeckte Metalle. Anwendung der Spektralanalyse auf die Natur der Himmelskörper. Aus was besteht die Sonne? Sonnenprotuberanzen. Technische und medizinische Anwendungen der Spektralanalyse.

Sieben Jungfrauen vereinigten sich — so lautet eine indische Fabel — um die Ankunft des Lichtgottes Krischna zu feiern. Als derselbe ihnen aber erschien und sie aufforderte, vor ihm zu tanzen, mußten sie trauernd gestehen, daß ihnen die Tänzer fehlten. Darauf teilte sich der Gott in sieben Teile, und jede Tänzerin erhielt ihren Krischna.



370. Lichtbrechung im Wasser.



371. Bestimmung des Brechungsverhältnisses.

Diese Mythe hat eine überraschende Sinnverwandtschaft mit einer Erzählung, die uns Pindar überliefert hat. Als die Götter die Erde unter sich geteilt hatten, war der Sonnengott vergessen worden, und es blieb, ihn zu entschädigen, nur eine Insel übrig, welche eben aus dem Meere aufstieg; diese erhielt er denn auch — es war die Insel Rhodos, genannt nach der Geliebten des Sonnengottes, von welcher dieser sieben wunderbar begabte Söhne erhielt — und sie blieb dem Kultus des göttlichen Feuers heilig. — Auf den antiken Abbildungen ist Apoll mit einem aus sieben Lichtpunkten bestehenden Diadem geschmückt, und bei Julian heißt die Gottheit der Sonne der „siebenstrahlige Gott“, welche sinnvolle Bezeichnung chaldäischen Ursprunges sein soll.

Diese poetischen Anschauungen längst vergangener Zeiten spiegeln aber auf merkwürdige Weise sich in gewissen streng entwickelten Theorien der neueren Naturforschung wieder. Mag es auch sein, daß die sieben durch Krischna beglückten Jungfrauen und die sieben Söhne der rhodischen Nymphe, wie so vieles andere, der heiligen Zahl zu Gefallen gedichtet worden sind, und daß erst in dem wunderbaren Bilde des Regenbogens sieben Farben in Anlehnung hieran unterschieden und bezeichnet wurden — gleichviel, in jenen Mythen liegt für uns die älteste Wurzel einer Farbenlehre, welche, durch die Newtonschen Entdeckungen wissenschaftlich begründet, einem weiten Gebiete von Erscheinungen als ein jetzt klar erkanntes sicheres Fundament unterbreitet ist.

Brechung des Lichtes. Das entzückende Farbenspiel des Diamanten, die sinnetäuschende Fata morgana, die das Kleinste und das Fernste auflösende Kraft linsenförmig geschliffener Gläser, die „aus Perlen gebaute Brücke“ des Regenbogens — sie beruhen alle

auf einer einzigen Eigentümlichkeit des Lichtstrahls, eine andere Richtung einzuschlagen, wenn er aus gewissen durchsichtigen Körpern in andere übergeht, oder wenn die Dichtigkeit des Körpers, in welchem er sich fortbewegt, innerhalb der verschiedenen durchlaufenen Schichten verschieden groß ist. Diese Eigentümlichkeit heißt die Brechbarkeit des Lichtes. Wir können sie durch einen einfachen Versuch zur Erscheinung bringen, wenn wir in ein leeres Becken, von welchem wir so weit entfernt stehen, daß sein Boden uns durch den Rand gerade verdeckt ist, ein Geldstück legen. Obwohl uns dasselbe bei unserer angenommenen Stellung nicht sichtbar ist, so erscheint uns sein Bild doch sofort, wenn das Becken mit Wasser gefüllt wird. Die von dem Geldstück reflektierten Lichtstrahlen werden, wenn sie aus dem Wasser in die Luft übergehen, von ihrem ursprünglichen Wege abgelenkt, und ein Teil derselben, welcher, als das Becken leer war, nicht unser Auge treffen konnte, kann nunmehr in dasselbe gelangen (Abb. 370). Das Geldstück liegt für uns daher scheinbar in einer anderen Richtung als in Wirklichkeit, und das ist auch die Ursache, warum man Fische im Wasser mit dem Gewehr nicht treffen kann, wenn man nicht etwas unterhalb der Stelle zielt, an der sie sich zu befinden scheinen. Die Ursache dieser Erscheinungen ist, daß der Lichtstrahl bei seinem Austritt aus Wasser in Luft, überhaupt bei dem Austritt aus einem dichteren in ein anderes, optisch minder dichtes Mittel von der Senkrechten (dem Einfallslot) abgelenkt wird; umgekehrt wird Licht, das aus Luft in Wasser übergeht (Ab. 371), dem Einfallslot zugekehrt. Der Winkel acd, den der einfallende Lichtstrahl ac mit dem Einfallslot cd bildet, heißt der Einfallswinkel, während der Winkel, welchen der abgelenkte Lichtstrahl cb mit der Verlängerung des Einfallslotes ce bildet, also der Winkel bce, Brechungswinkel heißt.



372. Fata morgana.

Mit der Größe des Einfallswinkels ändert sich auch der Brechungswinkel, aber in einer ganz bestimmten Weise: Das Verhältnis des Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels ist konstant und heißt der Brechungsexponent oder Brechungsindex. $\frac{\sin acd}{\sin bce} = \frac{ad}{be} =$ konstant. Dieses Gesetz ist im Jahre 1620 von Snellius entdeckt, aber erst im Jahre 1637 von Descartes veröffentlicht worden. Geht der Lichtstrahl aus einem optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres Medium über, so ist der Brechungsexponent ein unechter Bruch, im umgekehrten Falle ein echter Bruch. Für die beiden Medien, Luft und Wasser, in denen sich der Lichtstrahl in Abb. 371 bewegt, würde der Brechungsexponent

durch die Verhältniszahlen $\frac{4}{3}$ oder $\frac{3}{4}$ ausgedrückt werden, je nachdem der Lichtstrahl aus Luft in Wasser (aus dem dünneren Medium in das dichtere), oder aus Wasser in Luft (aus dem dichteren Medium in das dünnere) übergeht. In der Regel bezieht man die Angaben des Brechungsexponenten der verschiedenen Substanzen auf die atmosphärische Luft (oder genauer auf den luftleeren Raum) als Einheit, der Brechungsexponent des Wassers ist alsdann gleich 1,333. Je größer der Brechungsexponent für zwei Medien ist, um so größer ist der Unterschied ihrer Lichtbrechung. Wenn das Licht innerhalb der verschieden dichten Schichten eines Körpers gebrochen wird, so steht deren Lichtbrechung in engem Zusammenhange mit deren Dichtigkeit selbst. Im allgemeinen wird der Lichtstrahl dem Einfallslote zugebrochen, wenn er aus einem dünneren in ein dichteres Mittel übergeht. Es finden aber auch Ausnahmen statt. Benzol z. B. bricht das Licht viel stärker als manche Glassorten, obwohl es viel weniger dicht ist als diese. Wenn wir daher im Verlaufe des Folgenden **dichter** und **dünner** manchmal in Bezug auf die verschiedene Größe der Lichtbrechung gebrauchen werden, so geschieht dies der Kürze des Ausdrucks wegen und immer in dem Sinne, daß wir nur die optischen Eigentümlichkeiten, die optische Dichtigkeit, dabei im Auge haben.

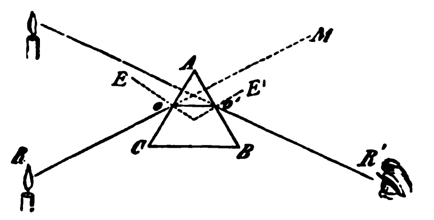

373. Prisma mit Fassung.

Die **Fata morgana** zeigt uns einen Fall, wo das Licht innerhalb eines und desselben Körpers gebrochen wird. Die ungleichmäßige Erwärmung durch die Sonne und namentlich die Ausstrahlung des Erdbodens dehnt die Luft in den über einander liegenden Schichten verschieden aus, so daß die einzelnen Regionen eine verschiedene Größe der Lichtbrechung erhalten. Es kann dann, genau so wie das durch den Rand der ursprünglich leeren Schüssel verdeckte Geldstück durch das stärker brechende Wasser sichtbar gemacht wird, auch eine jenseit des Horizonts liegende Landschaft infolge des verschiedenen Brechungsvermögens der verschiedenen Luftschichten sichtbar werden. Wechseln gar dünnere und dichtere Schichten regelmäßig mit einander ab, so werden die zusammenstoßenden Flächen noch Veranlassung zu Spiegelungen bieten, in deren Folge das Bild wiederholt — aufrecht und verkehrt — erscheint. Es erscheint somit keineswegs unerklärlich, wenn die Luft der verdurstenden Karawane lachende Oasen vorgaukelt; glaubten doch (nach Zeitungsberichten) auf dem Pik von Teneriffa die verwunderten Besteiger desselben die tausend Meilen entfernte Kette des Alleghanygebirges in Amerika zu erblicken.

Alle Lichtstrahlen, die, aus dem mit zartem Lichtäther erfüllten Weltraume kommend, in unsere dichtere Atmosphäre eintreten, werden ebenso abgelenkt, und wir sehen infolgedessen nur die Sterne, welche gerade über uns, im Zenith, stehen, an ihrem wirklichen Orte, alle anderen aber etwas zu hoch, und zwar um so mehr, je näher sie dem Horizont stehen, je dicker und dichter also die Luftschicht, welche ihre Strahlen zu durchlaufen haben, ehe sie zu uns kommen. Dies Phänomen heißt in der Astronomie **atmosphärische Refraktion**.

Das **Prisma**, „jenes Instrument“, „welches“ wie Goethe sagt, „in den Morgenländern so hoch geachtet wird, daß sich der chinesische Kaiser den ausschließlichen Besitz desselben gleichsam als ein Majestätsrecht vorbehält, dessen wunderbare Eigenschaften uns in der ersten Jugend auffallen und in jedem Alter Verwunderung erregen“, ein Instrument, auf dessen Wirkungsweise die Farbentheorie beruht, ist der Gegenstand, mit dem wir uns zunächst beschäftigen werden. Für uns haben die eifersüchtigen Ansprüche des „Sohnes der Sonne“ glücklicherweise keine bindende Kraft. Das einfache Instrument, ein dreiseitig geschliffener Glaskörper mit ebenen Flächen und parallelen Kanten, ist so verbreitet, daß sich jedes Kind an seinem bunten Farbenspiele erfreuen kann. Für den Physiker

bedarf es zum Studium der prismatischen Erscheinungen sogar nur zweier, unter einem spitzen Winkel scharf zusammenstoßender ebenen Flächen. Zur bequemeren Handhabung bei physikalischen Versuchen gibt man dem Prisma, welches dann aus gutem und durchweg homogenem Glase auf das feinste geschliffen wird, eine Fassung von Messing, um es in jeder wünschenswerten Lage einstellen und befestigen zu können (Abb. 373). Wie aus Glas, so stellt man Prismen auch aus anderen durchsichtigen Körpern, sogar aus Flüssigkeiten und Gasarten dar, die man durch dünne, planparallele Glasplatten einschließt.



374. Brechung des Lichtes durch das Prisma.

Wie verhält sich nun ein Lichtstrahl bei seinem Durchgange durch ein Prisma? Dies soll uns Abb. 374, welche in dem Dreieck ABC den Querschnitt eines gleichseitigen Prismas zeigt, deutlich machen. AC und AB heißen die brechenden Flächen, die Kante A die brechende Kante, der von CA und BA bei A eingeschlossene Winkel der brechende Winkel, und die Fläche BC die Basis des Prismas. Ro ist der einfallende Lichtstrahl. Bei seinem Eintritt aus der Luft in das dichtere Mittel (Glas) wird der Strahl Ro dem Einfallslote oE zu gebrochen, bei seinem Austritt aus der Fläche AB aber dadurch, daß er nun wieder in die minder dichte Luft gelangt, von der Senkrechten o'E' abgelenkt. Anstatt seiner ursprünglichen Richtung zu folgen, geht er daher schließlich nach R' weiter. Halten wir also in der angegebenen Weise ein Prisma vor unser Auge, so werden wir die dahinter befindlichen Gegenstände nicht in ihrer wirklichen Lage in der Richtung MR erblicken, sondern dieselben erscheinen uns von ihrem Platze verrückt, und zwar in dem in Abb. 374 und 375 angenommenen Falle nach oben abgelenkt, denn was für einen Strahl gilt, das gilt auch für alle anderen von einem Gegenstande ausgehenden Strahlen.

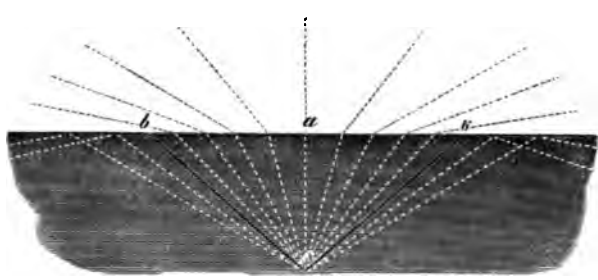

375. Ablenkung des Bildes durch das Prisma.

Die Größe der Ablenkung hängt ab von der Größe des brechenden Winkels bei A, von dem Brechungsexponenten der Substanz des Prismas und von der Größe des Einfallswinkels.

Es gibt eine bestimmte Stellung des Prismas, in welcher es gewöhnlich für optische Versuche benutzt wird, die sogenannte Minimumstellung, bei welcher ein Lichtstrahl die geringste Ablenkung durch dasselbe erfährt. Es ist das diejenige Stellung, bei welcher der auffallende Strahl Ro (Abb. 374) denselben Winkel mit der Einfallsfläche AC bildet, wie der austretende Strahl R'o' mit der Austrittsfläche AB, oder, bei welcher der Lichtstrahl oo' durch das Prisma symmetrisch hindurchgeht.

Totale Reflexion. Unter gewissen Verhältnissen kann der Strahl aus einem stärker brechenden Mittel in ein solches von geringerer Brechbarkeit gar nicht heraustreten.

Dort nämlich, wo die Strahlen auf die trennende Fläche (ba in Abb. 376) unter einem solchen Winkel acb auftreffen, daß sie bei der Ablenkung an der Fläche selbst hingleiten würden, gehen die Brechungserscheinungen in Spiegelungserscheinungen über. Alle Strahlen, die noch schiefer gegen die Trennungsfläche treffen, können nicht mehr in die Luft austreten, sondern werden von der Trennungsfläche reflektiert, und zwar vollständiger, als von einem gewöhnlichen Metallspiegel, der immer einen großen Teil des Lichtes verschluckt (absorbiert). In unserer Abb. 376 werden also die Strahlen, welche von dem innerhalb des dichteren Mittels gelegenen Ausstrahlungspunkte c ausgehen, gebrochen oder **total reflektiert**, je nachdem ihre Richtungen innerhalb oder außerhalb des Strahlenkegels bcb' liegen; und zwar werden alle diejenigen Strahlen, welche innerhalb jener Kegelfläche liegen, durch die trennende Fläche der beiden Mittel hindurch aus dem dichteren in das weniger dichte Mittel hinaustreten, die Strahlen b dagegen in der Richtung der Oberfläche weitergeleitet werden, weil dem Winkel, unter dem sie auftreffen, der Brechungswinkel von 90° entspricht, dessen Sinus den größtmöglichen Wert 1 hat; endlich alle diejenigen Strahlen, welche unter noch kleinerem Winkel die Oberfläche treffen, können aus dem dichteren Mittel an dieser brechenden Fläche keinen Austritt finden, sie müssen demzufolge ganz und gar reflektiert werden. Da ein Lichtstrahl beim Übergange aus einem dünneren Mittel in ein dichteres dem Einfallslote zu gebrochen wird, so kann sein Eintritt in ein solches immer stattfinden, die totale Reflexion findet nur bei dem Übergang aus einem dichteren in ein weniger dichtes Medium statt; der **Grenzwinkel**, bei welchem totale Reflexion eintritt, hat für die verschiedenen Körper verschiedene Werte; beim Übergang von Wasser in Luft beträgt er etwa $48\frac{1}{2}$ Grad, beim Übergang von Glas in Luft je nach der Dichtigkeit der Glassorte 40—37 Grad, beim Übergang von Diamant in Luft noch nicht ganz 24 Grad.



376. Totale Reflexion.

Ein einfaches und hübsches Beispiel der totalen Reflexion zeigt ein leeres Glasröhrchen, wenn es in einem mit Wasser gefüllten Becherglas in der durch Abb. 377 angedeuteten Lage sich befindet. Betrachtet man dasselbe von oben her, etwa von o aus, so erscheint es in blendendem Metallglanze, weil die von a kommenden Lichtstrahlen das Röhrchen unter einem solchen Winkel treffen, daß sie nicht in die Luft des Röhrchens austreten können, sondern total reflektiert werden. Gießt man Wasser in das Röhrchen, so verschwindet der Glanz bis zur Oberfläche des eingegossenen Wassers, weil nunmehr die von a kommenden Strahlen nicht mehr total reflektiert werden, sondern in das Wasser eindringen können.



377. Beispiel der totalen Reflexion.

Eine interessante Anwendung der totalen Reflexion hat man in der Konstruktion der **Camera lucida** gemacht. Der Apparat besteht im wesentlichen aus einem sehr kleinen drei- oder vierseitigen Prisma abcd (Abb. 378), welches bei a einen rechten und bei c einen stumpfen Winkel von etwa 135 Grad hat. Die Lichtstrahlen, welche senkrecht auf die Fläche ab in das Prisma eintreten, werden an der Fläche bc zum erstenmal und an der Fläche cd zum zweitenmal total reflektiert und treffen dann erst die Fläche ad steil genug, um aus ihr austreten zu können. Wenn der Beobachter sein Auge in die Richtung der austretenden Strahlen bringt, so wird er in derselben das

Bild der gespiegelten Gegenstände sehen. Und wenn das Prisma so kleine Dimensionen hat, daß man neben demselben, wenn man es sehr nahe vor das Auge hält, noch vorbei sehen kann, so lassen sich auf einer in deutlicher Sehweite angebrachten weißen Papierfläche mittels eines Bleistiftes die Umrisse des gespiegelten Bildes bequem und getreu nachzeichnen. In dieser, zuerst von dem englischen Physiker Wollaston angegebenen Form und Anwendung heißt der Apparat Camera lucida oder clara.



378. Die Camera lucida.

Abbes Refraktometer. Wollaston hat zuerst die Erscheinung der Totalreflexion zur Bestimmung der Brechungsexponenten von Flüssigkeiten benutzt. Die darauf gegründeten Beobachtungsmethoden führten zur Konstruktion von Instrumenten, welche Totalrefraktometer heißen und sich durch Einfachheit und Bequemlichkeit der Beobachtung auszeichnen. In Abb. 379 u. 380 ist das Abbesche Refraktometer dargestellt, welches in neuerer Zeit in der Wissenschaft wie in der Praxis mit Recht weit verbreitete Anwendung gefunden hat. Die ganze Messung beschränkt sich auf die Beobachtung der Totalreflexion, welche die betreffende Flüssigkeit, in sehr dünner Schicht zwischen Prismen aus stärker brechender Substanz eingeschlossen, an durchfallenden Strahlen ergibt. Zur Untersuchung genügt deshalb schon ein einziger Tropfen der betreffenden Flüssigkeit, die in dickeren Schichten beliebig undurchsichtig sein kann. Die ganze, bei diffusem Tageslicht oder Lampenlicht auszuführende Beobachtung besteht in einer einzigen Einstellung und in der nachfolgenden Ablesung an einem Gradbogen oder an einer Okularskala. Das Instrument besitzt ein Doppelprisma P aus stark brechendem Flintglase, welches mit einer Alhidade verbunden und mit dieser auf einem geteilten Sektor B drehbar ist. Der Sektor trägt ein Beobachtungsfernrohr F und ist mit diesem um eine horizontale Achse umlegbar auf schwerem Messingfuße montiert. Um eine Messung ausführen zu können, legt man das Instrument um, schiebt das eine Prisma vorsichtig ab und nach Aufbringung eines Tropfens der zu bestimmenden Flüssigkeit wieder auf; der Tropfen befindet sich also zwischen den Trennungsflächen T der beiden Prismen. Fallen nun vom Spiegel S Lichtstrahlen auf das Doppelprisma, so

380. Abbes Refraktometer.

379. Einrichtung von Abbes Refraktometer.

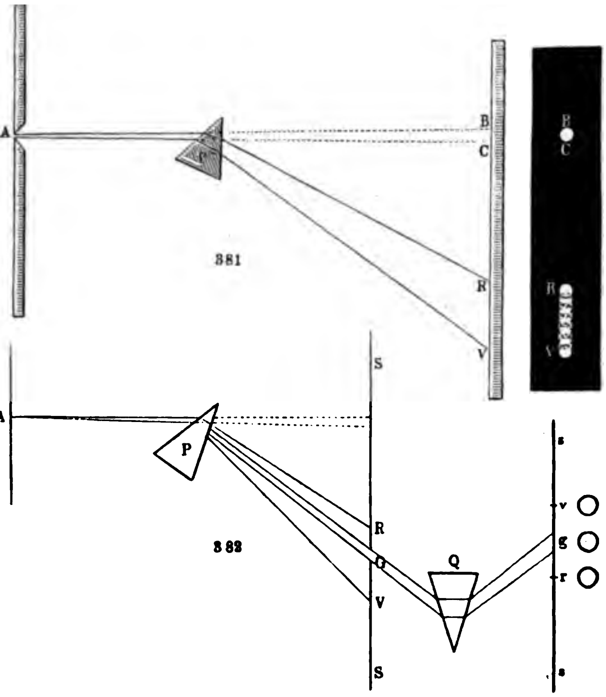
werden dieselben, falls sie über eine gewisse Grenze schräg auf die Flüssigkeitsschicht fallen, total reflektiert, und man sieht bei Anwendung von Natriumlicht in dem auf Unendlich eingestellten Fernrohre das Gesichtsfeld scharf durch einen dunkeln und hellen Teil abgegrenzt. Auf diese Grenze stellt man das Fadenkreuz des Fernrohrs ein: die Teilung auf dem Sektor A B gibt dann an dem Index der Alhidade den Brechungsexponenten der Flüssigkeit für Natriumlicht direkt bis auf die dritte Dezimale, und durch Schätzung mittels einer Ableselupe bis auf wenige Einheiten der vierten Dezimale an. Das Fernrohr trägt ferner vor seinem Objektiv ein System aus zwei drehbaren geradsichtigen (Amicischen) Prismen, den sogenannten Kompensator, zur Achromatisierung der Grenzlinie der Totalreflexion bei Anwendung von weißem Licht, deren Drehung an einer geteilten Trommel T' abgelesen werden kann und die Daten zur Berechnung der Dispersion der Flüssigkeit mittels einer beigegebenen Tabelle liefert. Der Refraktometer ist anwendbar für Brechungsindices zwischen 1,30 und 1,70.

Spektrum. Wenden wir uns aber zum Prisma zurück. Man könnte erwarten, daß, wenn man anstatt eines einzigen Lichtstrahles, den man in praxi ja doch nicht isolieren kann, ein Strahlenbündel, etwa wie es durch eine kleine kreis- oder spaltförmige Öffnung in ein sonst verdunkeltes Zimmer fällt, durch ein Prisma gehen läßt, daß dann dieses ganze Strahlenbündel infolge der Brechung gerade so von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt werde, wie der einzelne Strahl, und daß auf der entgegengesetzten Wand ein weißes, kreis- oder spaltförmiges, von der ursprünglichen Richtung des Strahles abgelenktes Lichtbild sich abzeichnen müßte. Dem ist aber nicht so. Vielmehr machen wir, wenn wir den Versuch in der durch Abb. 381 angedeuteten Weise anstellen, die merkwürdige Beobachtung, daß das Bild der Öffnung durch das Prisma in die Länge gezogen und in regelmäßiger Art gefärbt ist. Dieses Bild nennen die Physiker Spektrum, und wenn es durch Sonnenlicht hervorgerufen worden ist, Sonnenspektrum. Es gleicht einem Stück Regenbogen; wir finden die gleichen Farben hier wie dort, und in derselben Aufeinanderfolge von Rot zu Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett. Am schönsten ist die Erscheinung zu beobachten, wenn man das Sonnenlicht durch einen schmalen, vertikalen Spalt auf ein Flintglasprisma, dessen brechende Kante den Rändern des Spaltes parallel gestellt ist, gehen läßt und die gebrochenen Strahlen durch ein Fernrohr betrachtet oder auf einen Schirm auffängt. Abb. 381 zeigt die Newtonsche Anordnung mit einer kreisförmigen Öffnung, und die am Anfange und am Ende des sichtbaren Spektrums stehenden Buchstaben R und V deuten die Farbe der betreffenden Strahlen in der vorhin bezeichneten Reihenfolge von Rot nach Violett an. Man nennt die Zerlegung des Lichtes in seine einzelnen Bestandteile Dispersion (Zerstreuung). Die Größe der Dispersion ist wesentlich von der Natur des Prismas abhängig, sie ist größer für ein Prisma aus schwerem Glase (Flintglas), als für ein solches aus leichtem Glase (Crownglas).

Wollaston hat 1802 die Beobachtung in der angegebenen Weise zuerst gelehrt; der erste aber, welcher überhaupt das Spektrum im dunklen Zimmer durch eine kreisförmige Öffnung darstellte, war Newton. Ihm verdanken wir auch die richtige Deutung der merkwürdigen Erscheinung.

Die roten Strahlen des Spektrums werden durch das Prisma um eine geringere Größe von ihrer direkten Richtung abgelenkt als die violetten, und die dazwischen liegenden verschiedenfarbigen Strahlen erleiden eine verschiedene und um so größere Brechung, je weiter sie eben von der roten Grenze des Spektrums entfernt und je näher sie der violetten Grenze zu liegen. Wir müssen aus diesen Erscheinungen schließen, daß das uns weiß erscheinende gewöhnliche Licht nicht einfacher Natur ist, d. h. daß es nicht aus Wellen gleicher, sondern verschiedener Wellenlänge besteht, daß es durch das Prisma in seine einzelnen Bestandteile zerlegt wird, welche verschieden gebrochen werden und auf unser Auge einen verschiedenfarbigen Eindruck machen. Licht von gleicher Brechbarkeit, welches durch das Prisma nicht weiter zerlegt werden kann und nur ein einfarbiges Spektrum zeigt, heißt homogenes Licht. Kleine vertikale Partieen des Spektrums kann man als homogenes Licht bezeichnen.

Die richtige Deutung eines wichtigen physikalischen Experiments wird aber ebenso wie die Richtigkeit eines gerechneten Exempels erst dadurch erhärtet, daß es die Probe besteht. Können wir das weiße Licht in seine verschiedenen Bestandteile zerlegen, so muß sich notwendig auch aus der Wiedervereinigung dieser Bestandteile vollkommenes Weiß erzeugen lassen. Und so ist es in der That. Das Mittel hierzu hat ebenfalls Newton in seinem berühmten „experimentum crucis“ angegeben. Wenn man nämlich bei richtiger Stellung mittels eines entgegengesetzt gehaltenen Prismas von derselben brechenden Kraft wie der des ersten das Spektrum betrachtet, so werden die verschiedenen Partieen desselben wieder zu einem vollkommen weißen Bilde der Spaltöffnung vereinigt. Fängt man nicht das ganze Spektrum, sondern nur einzelne Strahlenpartieen desselben auf, so kann man die Bestandteile derselben auch durch ein zweites Prisma mit einander vermischen; nur entsteht dann nicht mehr Weiß, sondern es bildet sich eine Farbe, die ihrerseits mit den ausgeschiedenen Strahlen erst Weiß geben würde. Nehmen wir Rot weg, so geben die noch übrig bleibenden Strahlen Grün; fehlt Blau, so erhalten wir Orange. Rot und Grün ergänzen sich zu Weiß, wie sich Blau und Orange und in derselben Art Violett und Gelb zu Weiß ergänzen. Jede prismatische Farbe hat also eine prismatische Ergänzungsfarbe, mit welcher sie vereinigt Weiß gibt. Zwei solcherart zusammengehörige Farben heißen **Komplementärfarben**. Wie **Helmholtz** gezeigt hat, ist die optische Kombination zweier Farbentöne meistens sehr verschieden von derjenigen Farbe, die man durch Mischung der entsprechenden Pigmente erhält. Durch Mischung der Pigmente Chromgelb und Ultramarin erhält man z. B. Grün. Klebt man dagegen auf eine Kreisscheibe abwechselnd Sektoren von chromgelbem und von ultramarinblauem Papier und wählt die gelben Sektoren etwa $^2/_3$ so breit wie die blauen, so erscheint bei rascher Rotation die Scheibe (Farbenkreisel) in weißlichem Grau. Man würde vollständiges Weiß erhalten, wenn man statt der Pigmente die entsprechenden reinen prismatischen Spektralfarben wählen könnte. — Ursprung und innerer Zusammenhang dieser Erscheinungen, welche sich auf exakte Weise aus dem Spektrum ableiten, bilden das Wesentliche der **Newtonschen Farbenlehre**.



881 u. 882. Newtons Versuch mit dem Sonnenspektrum.

Die **Farben**, d. h. die prismatisch zerlegten Bestandteile des weißen Lichtes, sind demnach nichts anderes als verschiedene Eindrücke auf unseren Sehnerv, durch Lichtstrahlen von verschiedener Brechbarkeit hervorgerufen, ebenso wie die Töne nichts außerhalb unseres Ohres Liegendes sind, sondern nur in unserer Gehörempfindung, in verschiedenen Eindrücken auf unseren Gehörnerv bestehen, welcher durch periodische Aufeinanderfolge von Luftschwingungen verschiedener Schwingungsdauer erregt wird. Wir haben die Tonempfindung bereits ausführlicher in dem Abschnitt „Vom Schall“ besprochen; hier sei aber nochmals auf die Analogie zwischen Ton und Farbe hingewiesen.

Die verschiedene Brechbarkeit der Lichtstrahlen ist eine Folge ihrer verschiedenen Schwingungsdauer, und die Farben stehen unter einander in einem ähnlichen Verhältnis der Höhe und Tiefe, wie die Töne der Musik, nur daß es sich bei ihnen, welche durch ein ungleich feineres Medium, den Lichtäther, übertragen werden, auch um viel feinere Zeitunterschiede, um viel größere Geschwindigkeiten handelt. Wenn unser Ohr schon eine Wellenfolge von ungefähr 33 Erschütterungen in der Sekunde noch als Ton zusammenzufassen vermag, wird das Auge erst von Schwingungen erregt, die mit der Geschwindigkeit von 450 Billionen in der Sekunde in dasselbe eindringen. Jener tiefste Ton für das Ohr ist das Contra-C, für das Auge ist der tiefste Farbenton das dunkelste Rot des Spektrums. Der höchste musikalische Ton, den wir noch zu hören vermögen, hat eine Schwingungszahl von etwa 32 000, und wir sind im stande, mehr als neun Oktaven mit dem Ohr zu unterscheiden. Dem Auge ist eine entsprechende Fähigkeit nicht gegeben, denn schon mit 800 Billionen Schwingungen in der Sekunde hört für dasselbe die Farbenempfindung in dem äußersten Violett auf. Es vermag nicht einmal eine einzige ganze Oktave (welche ungefähr bis 900 Billionen Schwingungen gehen würde) zu umspannen. Es ist in hohem Grade interessant, zu sehen, daß sich im äußersten Violett die Farbentöne, je mehr sie sich der Oktave nähern, in unserer Farbenempfindung auch um so mehr wieder dem äußersten Rot zuneigen; wir könnten uns vorstellen, daß ein entsprechend subtiles Auge die Schwingungen von 900 Billionen in der Sekunde wieder als reines, aber erhöhtes Rot, gewissermaßen als eine Potenz von dem tiefsten Tone des Spektrums, empfinden würde. Herrscht vielleicht für unsere Sinnesempfindungen eine Gruppierung der Erscheinungen nach Oktaven, im ganzen Reich der Schwingungen, und liegt es vielleicht nur an der Mangelhaftigkeit unserer Sinne, wenn wir diese Periodizität bloß in beschränktem Maße uns zum Bewußtsein bringen können? Die Schwingungen selbst existieren in Wirklichkeit über diese unseren Sinnen gezogene Grenze der Empfänglichkeit hinaus, wie die Wärmewirkungen im ultraroten und die chemischen Wirkungen im ultravioletten Teile des Spektrums zeigen; es käme, um jene Frage zu lösen, für uns eben darauf an, ein Organ zu besitzen, welches in gleicher Weise die tiefsten Luftschwingungen, die wir jetzt als solche empfinden, und dazu noch solche, denen eine Schwingungszahl von 900 Billionen zukommt, als Licht zu empfinden vermöchte. Ob manche Tiere eine solche erhöhte Empfindung besitzen, ist schwer zu entscheiden, unmöglich ist es nicht.

Es sei gestattet, an dieser Stelle die geistreiche und anschauliche Schilderung Doves einzuschalten, welche zeigt, wie die Schwingungen nach einander Ton-, Wärme- und Lichtempfindungen bewirken: „In der Mitte eines großen finsteren Zimmers mag sich ein Stab befinden, der in Schwingungen versetzt ist, und es soll zugleich eine Vorrichtung vorhanden sein, die Geschwindigkeit dieser Schwingungen fortwährend zu vermehren. Ich trete in dieses Zimmer in dem Augenblicke, wo der Stab viermal schwingt; weder Auge noch Ohr sagt mir etwas von dem Vorhandensein dieses Stabes, nur die Hand, welche seine Schläge fühlt, indem sie ihn berührt. Aber die Schwingungen werden schneller, sie erreichen die Zahl zweiunddreißig in der Sekunde, und ein tiefer Baßton schlägt an mein Ohr. Der Ton erhöht sich fortwährend; er durchläuft alle Mittelstufen bis zum höchsten schrillenden Ton; aber nun sinkt alles in die vorige Grabesstille zurück. Noch voll Erstaunen über das, was ich hörte, fühle ich (bei zunehmender Geschwindigkeit des schwingenden Stabes) plötzlich von der Stelle her, an welcher der Ton verhallte, eine angenehme Wärme sich strahlend verbreiten, so behaglich, wie es ein Kaminfeuer aussendet. Aber noch bleibt alles dunkel. Doch die Schwingungen werden noch schneller; ein schwaches rotes Licht dämmert auf, es wird immer lebhafter, der Stab glüht rot, dann wird er gelb und durchläuft alle Farben, bis nach dem Violett alles wieder in Nacht versinkt. So spricht die Natur nach einander zu verschiedenen Sinnen, zuerst ein leises, nur aus unmittelbarer Nähe vernehmliches Wort, dann ruft sie mir lauter aus immer weiterer Ferne zu, endlich erreicht mich auf den Schwingen des Lichtes ihre Stimme aus unmeßbaren Weiten." —

Bekanntlich hat Goethe gegen die einfachen Newtonschen Sätze eine eigene „Farbenlehre“ geltend zu machen gesucht. Es widerstrebte dem großen Dichter, das Licht und die durch dasselbe bedingten Erscheinungen einer mathematischen Behandlung unterworfen und den allbelebenden Strahl der Sonne gemessen und berechnet zu sehen. Deswegen verschloß er sich auch gegenüber der Beweiskraft experimenteller Untersuchungen und belächelte den Schluß der Anhänger des großen Briten, welche durch das Prisma die einzelnen Bestandteile des Sonnenstrahles zu sondern sich unterfingen:

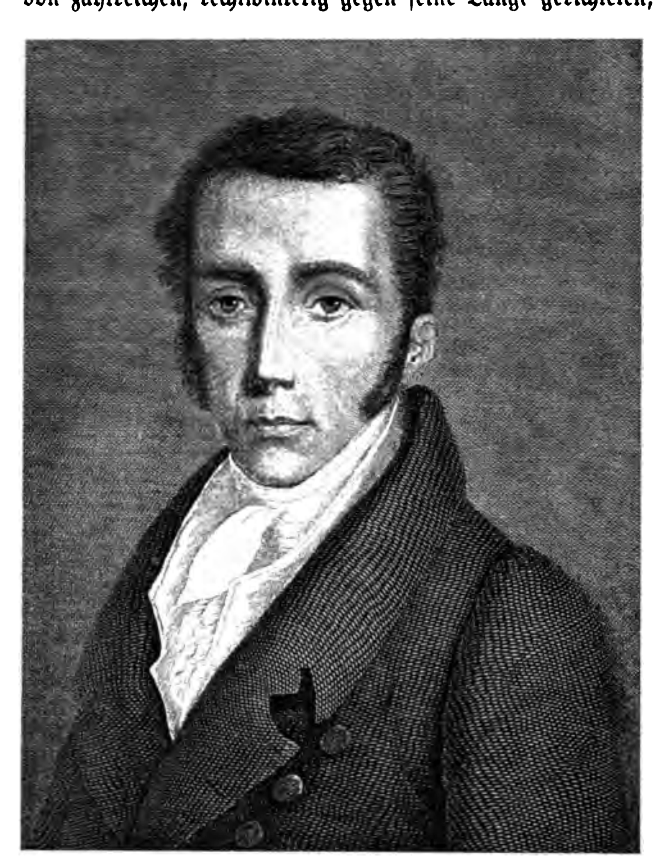
Aufgedröselt, bei meiner Ehr'!
Siehst ihn, als ob's ein Stricklein wär',
Siebenfarbig statt weiß, oval statt rund! —
Glaube hierbei des Lehrers Mund:
Was sich hier aus einander reckt,
Das hat alles in einem gesteckt.

Dieser Goethesche Hohn hat ein ganzes Heer von Nachbetern gefunden. Indessen, so leidenschaftlich sich auch das Gebaren dieser Adepten zeigt — sie behandeln, ohne jedes Verständnis einer strengen, exakten Methode der Forschung, kritiklos allgemeine Phrasen als Begriffe, Deutungen und Vergleiche als fundamentale Wahrheiten. Wie natürlich, haben ihre Bestrebungen weder die Wissenschaft, noch die Interessen des praktischen Lebens irgendwie gefördert.

Außer den sichtbaren farbigen Strahlen des Spektrums gibt es, wie wir schon angedeutet haben, im Sonnenlichte auch noch Strahlen, welche auf unser Auge so ohne weiteres keinen Eindruck hervorbringen. Sie werden vom Prisma ganz in derselben Art, wie die anderen gebrochen; wie wir aber zu hohe Töne nicht mehr zu hören vermögen, so wirken auf unseren Sehnerv auch die Ätherwellen, deren Brechbarkeit über die des Violett des Spektrums hinaus liegt, nicht mehr. Dagegen gibt es gewisse chemische Verbindungen, wie z. B. Chlor-, Brom- und Jodsilber, welche durch Einwirkung dieser, für unser Auge unsichtbaren, ultravioletten Strahlen eine Umwandlung erfahren, und man hat jene Strahlen wegen dieser ihrer chemischen Umwandlungsfähigkeit chemisch wirksame Strahlen genannt. Auf der chemischen Wirkung der Lichtstrahlen beruht die Photographie. Indessen kommt die Fähigkeit, chemische Wirkungen zu äußern, nicht ausschließlich den ultravioletten, sondern allen Strahlensorten zu. Davy und später Niepce gaben zuerst Verfahren an, Bilder durch Einwirkung des Lichtes auf Chlorsilber zu fixieren, methodisch ausgebildet wurden diese Verfahren aber erst durch Daguerre, nach welchem auch die Lichtbilder genannt wurden. Als Becquerel im Jahre 1842 das farbige Sonnenlicht auf einer „Daguerreotypplatte“ abbildete, erhielt er diese ultravioletten Strahlen, deren Ausdehnung diejenige des sichtbaren Spektrums bei weitem übersteigt, und es zeigte sich, daß die über das violette Ende des Spektrums herausreichenden, für das Auge unter gewöhnlichen Verhältnissen unsichtbaren Strahlen die kräftigste chemische Wirkung ausüben. Die Existenz dieser ultravioletten Strahlen läßt sich aber nicht bloß durch Photographie des Sonnenspektrums, sondern sehr bequem auch durch die Fluorescenz experimentell nachweisen. Mit dem Namen der Fluorescenz bezeichnet man die merkwürdige Eigentümlichkeit gewisser Substanzen, die Farbe der auf sie fallenden Lichtstrahlen zu ändern, d. h. Lichtstrahlen von anderer Farbe als derjenigen des auf sie fallenden Lichtes auszusenden. Solche fluorescierende Substanzen erhält man z. B. durch Abkochung von Kastanienrinde in Wasser, durch eine Lösung von Chlorophyll (Blattgrün) in Äther, durch einen alkoholischen Auszug aus dem Samen des Stechapfels; ferner sind Uranglas und eine Lösung von schwefelsaurem Chinin sehr schön fluorescierende Substanzen. Während die Chininlösung für durchgehendes Licht vollständig farblos erscheint, zeigt sie, vom Sonnenstrahl beleuchtet und von oben betrachtet, einen bläulichen Schimmer. Ausgebreitete Anwendung findet gerade in der neuesten Zeit als fluorescierende Substanz das Platinbaryumcyanür, welches so außerordentlich geeignet ist, die Wirkungsweise der Röntgenschen X-Strahlen, über welche später ausführlich gesprochen werden soll, sichtbar zu machen. Mittels eines mit Platinbaryumcyanür in geeigneter Weise her-

gestellten*) Papierschirmes lassen sich, wenn man ein Spektrum mit einem gewöhnlichen Prisma in der vorhin angegebenen Weise auf eine weiße Tafel entwirft, die ultravioletten Strahlen noch in einer Ausdehnung, die das sichtbare Spektrum um etwa das Dreifache seiner ganzen Breite übertrifft, leicht und bequem durch sein grünes Fluorescenzlicht einem größeren Zuhörerkreise sichtbar machen.

Die Fraunhoferschen Linien. Wollaston schon hatte bei seinen Untersuchungen des Sonnenspektrums gefunden, daß dasselbe nicht, wie es auf den ersten Augenblick den Anschein hat, aus kontinuierlich in einander übergehenden Partieen besteht, sondern daß es von zahlreichen, rechtwinkelig gegen seine Länge gerichteten, dunklen Linien durchsetzt ist (1802). Allein erst Fraunhofer, der berühmte Münchener Optiker, beobachtete (1814) diese Erscheinung genauer und fand dabei, daß die dunklen Streifen immer genau an derselben Stelle des Spektrums erscheinen, und ferner, daß ihre Zahl eine ungemein große ist; wie die Milchstraße in einzelne Sterne, so lösten sich vor seinen schärferen Instrumenten die vorher dunklen Bänder in immer neue gesonderte Linien auf. Er selbst bestimmte 576 solcher Linien, welche nach ihm die Fraunhoferschen Linien genannt worden sind.



383. Dr. Joseph von Fraunhofer.

Die am deutlichsten hervortretenden bezeichnete Fraunhofer mit Buchstaben; sie sind besonders dadurch wichtig, daß sie mit voller Bestimmtheit immer wieder aufgefunden werden können, wodurch sie das sicherste Mittel abgeben, sich in den einzelnen Partieen des Spektrums zu orientieren, die Farbennüancen zu bezeichnen und die Brechungsverhältnisse der verschiedenen Körper auf das genaueste zu bestimmen. Der Herstellung optischer Instrumente und den davon abhängigen Disziplinen, der Astronomie, der Mikroskopie, der Photographie u. s. w., hat die Fraunhofersche Entdeckung unschätzbare Dienste geleistet. So sind häufig wissenschaftliche Erfolge von zuvor ungeahnten Wirkungen, wenn sie auch dem Auge der Menge zunächst oft als fruchtlos und als spitzfindige theoretische Liebhabereien erscheinen mögen. Denn nichts ist in der Natur klein oder groß, sondern alles gleich bedeutend im großen Ganzen.

*) Das Auftragen der pulverisierten fluorescierenden Substanz auf die Schirmfläche geschieht derart, daß der über einer warmen Fläche befindliche Schirm mit starker Gelatinelösung präpariert und dann sofort auf die noch feuchte Fläche das Pulver mittels einer Siebvorrichtung gleichmäßig aufgetragen wird, während der Schirm langsam bewegt wird.

Die Lage der Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum zu veranschaulichen, dürfte unsere Tafel wohl geeignet sein. Dieselbe stellt das Sonnenspektrum dar. Die Linien A, B und C liegen im Rot, D in Orange, E auf der Grenze zwischen Gelb und Grün, F zwischen Grün und Blau, G im Indigoblau und H im Violett. Außer diesen Linien ist noch eine Gruppe von feinen Linien a zwischen A und B, ferner b zwischen E und F charakteristisch. Die über dem Sonnenspektrum angebrachte Skala dient dazu, jede bestimmte Farbe oder Linie genau angeben zu können. Wir sehen also, daß das durch ein Prisma dargestellte Spektrum des weißen Sonnenlichts kein kontinuierlich zusammenhängendes ist, daß die einzelnen Farbentöne nicht ganz allmählich in einander übergehen, sondern daß Strahlen von gewisser Brechbarkeit im Spektrum scheinbar fehlen.

Kontinuierliche Spektra und Spektra der Gase und Dämpfe. Ebenso wie das Sonnenlicht kann man auch jede andere Lichtquelle, wenn sie nur intensiv genug ist, zur Erzeugung von Spektren benutzen. Das Drummondsche Kalklicht z. B. und das elektrische Licht geben sehr glänzende Spektra, die sich von dem Sonnenspektrum dadurch unterscheiden, daß sie kontinuierlich sind, d. h. weder durch Lücken oder schroffe Übergänge in den Farben unterbrochen, noch von hellen oder dunklen Streifen durchzogen sind. Bei dem Drummondschen Licht ist der leuchtende Körper glühender Kalk, bei dem elektrischen Licht sind es glühende Kohlenteilchen — beides feste Körper. So wie die genannten beiden Körper verhalten sich alle festen Körper, wir erhalten immer kontinuierliche Spektra, mögen wir das Licht eines glühenden Platindrahtes, eines glühenden Kohlenstiftes, oder eines anderen, zwischen den Polenden einer galvanischen Batterie eingeschalteten und zum Glühen gebrachten Körpers untersuchen. Ganz andere Spektra dagegen erhalten wir, wenn wir das Licht von gasförmigen glühenden Körpern in geeigneter Weise durch ein Prisma gehen lassen. Die Spektra der Dämpfe und Gase sind nicht kontinuierlich, sondern bestehen aus einer oder mehreren glänzenden, für jedes Gas charakteristischen farbigen Linien, welche durch dunkle Zwischenräume von einander getrennt sind.



384. Geißlersche Röhre.

Das Licht gasförmiger Körper untersucht man mit Hilfe der von dem berühmten Physiker Plücker angegebenen und von dem Mechaniker Geißler in Bonn zuerst angefertigten Glasröhren, welche allgemein als Geißlersche Röhren bekannt sind. Dieselben haben für spektroskopische Untersuchungen gewöhnlich die einfache Form, welche uns Abb. 384 zeigt. Andere Formen werden später in der Elektrizitätslehre beschrieben werden. Sie sind an beiden Enden zugeschmolzen, nachdem sie vorher mit dem betreffenden Gase gefüllt und mittels der Geißlerschen Quecksilberluftpumpe bis zu einem gewissen Grade der Verdünnung evakuiert worden sind. Vorher sind an den beiden Enden a und b Platindrähte eingeschmolzen und an diese Aluminiumdrähte, welche, mit den Polen eines Induktionsapparates in Verbindung gesetzt, den Übergang der elektrischen Entladungen durch das Gas im Innern der Röhre vermitteln. Das Gas strahlt dabei in eigentümlichem Lichte und zwar an der dünnen Stelle der Röhre am intensivsten. Diese Stelle dient nun vorzugsweise für die Untersuchung des Spektrums, welches je nach der Natur des Gases und je nach dem Drucke, unter welchem das Gas steht, sehr merkwürdige Verschiedenheiten zeigt. Ist z. B. eine solche Geißlersche Röhre mit Wasserstoffgas von einigen Millimetern Druck gefüllt, so leuchtet der enge Teil, sobald elektrische Entladungen von hoher Spannung hindurchgeleitet werden, mit einem intensiven karminroten Lichte. Dicht vor den Spalt des Spektroskops gebracht liefert dieses Licht, wie zuerst Plücker beschrieben hat, ein Spektrum von drei besonders markanten Linien, deren erste H_α im Rot mit der Fraunhoferschen Linie C, die zweite H_β mit der Fraunhoferschen Linie F im Grünblau zusammenfällt, während die dritte H_γ im Blau ganz in der Nähe der Fraunhoferschen Linie H gelegen ist; später ist in dem Spektrum des Wasserstoffs von Ångström noch eine vierte Linie H_δ im Violett gefunden worden, welche mit der Linie h zusammenfällt. Die Zwischenräume zwischen diesen Linien sind aber nicht ganz lichtleer, vielmehr zeigen sie Spuren eines kontinuierlichen Spektrums, welche bei Gas von größerer Dichtigkeit noch deutlicher auftreten.

So liefert jedes Gas ein bestimmtes, ihm charakteristisches Spektrum. Die Schärfe der Spektrallinien ist von dem Drucke des Gases abhängig, ebenso wie die Intensität des Leuchtens. Bis zu einem bestimmten Grade der Verdünnung nimmt dieselbe zu, um dann bei weiter fortgesetzter Verdünnung wieder abzunehmen. Merkwürdig ist bei diesen Lichterscheinungen ferner das Auftreten der sogenannten Schichtenbildung, abwechselnd dunkler und leuchtender Partieen oder Schichten, deren Anzahl mit abnehmendem Drucke abnimmt, so daß für eine bestimmte Röhre die Schichtenbildung einen annähernden Schluß auf die Druckverhältnisse des eingeschlossenen Gases gestattet, wenn auch ein gesetzmäßiger Zusammenhang bisher noch nicht aufgefunden ist.

Da nun die hellen, charakteristischen Linien sich nur in den Spektren der gasförmigen Körper zeigen, so wird es bei der Untersuchung eines Stoffes auf sein eigentümliches Spektrum immer zuerst darauf ankommen, ihn in eine Verbindung zu bringen, die durch die Flammenhitze in gas- oder dampfförmigen Zustand übergeführt wird. Die Erhitzung durch die Flamme genügt in vielen Fällen schon, wie man an der Veränderung bemerken kann, welche eine Spiritusflamme zeigt, in die man mittels eines schlingenförmig gebogenen Platindrahtes ein Körnchen Kochsalz hält; in anderen Fällen bringt man die betreffenden Körper zwischen die Pole einer galvanischen Batterie oder zwischen die Kohlenspitzen einer elektrischen Bogenlampe, oder setzt sie der Hitze eines Gebläsefeuers aus, oder führt sie in Verbindungen über, in denen sie leichter verdampfen. Läßt das Spektrum eigentümliche helle Linien erkennen, so rühren diese immer von einem Körper im gasförmigen Zustande her.



385. Gustav Robert Kirchhoff.

Das einfachste Spektrum zeigt das Natrium (s. Taf., Na), dasjenige Metall, welches im Kochsalz enthalten ist und sowohl für sich, als in dieser Verbindung in Dampf verwandelt werden kann. Das Spektrum des Natriumdampfes besteht aus einer einzigen hellen, gelben Linie, deren Lage, das Sonnenspektrum als Maßstab angenommen, mit derjenigen der Fraunhoferschen Linie D genau übereinstimmt. Lithium zeigt zwei mehr nach dem Orange und Rot hin gelegene Linien, Cäsium eine Liniengruppe im Gelb, Orange und Gelbgrün, außerdem aber zwei sehr charakteristische indigoblaue Linien. Das Rubidium zeigt fünf Linienpaare im Rot, Orange, Gelb, Grün und Violett; Thallium eine sehr scharfe Linie im Grün, Indium eine im Blau und eine schwächere im Violett. Cadmium, Zink, Aluminium zeigen eine Reihe ultravioletter Linien. Glühendes Sauerstoffgas hat zwei Linien im Rot, eine im Gelb, eine Liniengruppe im Grün und drei linienreiche Gruppen im Blau und Violett, wogegen Wasserstoff nur vier Linien hat, im Rot, Blau, Indigo und Ultraviolett, und das Spektrum des Stickstoffes neben zahl-

reichen Linien im Rot und Orange durch mehr als ein Dutzend eigentümlich kannellierter Linien im Blau und Violett charakterisiert ist.

Diese und zahlreiche analoge Erfahrungen haben nun zu jener neuen Untersuchungsmethode der Physik und Chemie geführt, die eben so wunderbar in ihrer Einfachheit als überraschend in ihren Resultaten ist, der Spektralanalyse, deren Geschichte und Wesen wir etwas näher betrachten wollen.

Die Spektralanalyse. Schon Fraunhofer machte die Bemerkung, daß sich die Spektren der Sonne, des Mondes und der Venus übereinstimmend in Bezug auf die sie durchsetzenden dunklen Streifen verhalten, daß dagegen in den Spektren mancher Fixsterne, wie des Prokyon, der Capella und der Beteigeuze, nur einige Linien, namentlich die Linie D, mit den Linien des Sonnenspektrums identisch sind. Brewster untersuchte 1822 die Fraunhoferschen Linien verschiedener gefärbten Flammen und beobachtete dabei neue und charakteristische Linien. Fünf Jahre später erklärte J. Herschel, der sich viel mit ähnlichen Untersuchungen beschäftigt und besonders die eigentümlichen Spektra von Flammen analysiert hatte, in denen Chlorstrontium, Chlornatrium und andere Salze verdampften, daß jene Substanzen ganz bestimmte Linien durch ihre Gegenwart in der Flamme hervorrufen und „daß man in der Verschiedenheit der Spektra ein ungemein scharfes Mittel habe, um äußerst geringe Spuren von gewissen Körpern zu entdecken.“ Ebenso bestimmt sprach sich Talbot aus, welcher gefunden hatte, daß im Spektrum der Alkoholflamme Kaliverbindungen einen charakteristischen roten Streifen hervorbringen; „wenn seine Beobachtungen richtig seien, so werde ein Blick ins Spektrum genügen, um Substanzen zu entdecken, die anders nur durch mühsame chemische Analysen ermittelt werden könnten.“



386. Robert Wilhelm Bunsen.

Aber trotz der so klar erkannten großen Bedeutung dieses Gegenstandes beschäftigte man sich noch lange Zeit nur sehr vereinzelt mit ihm. Es war auch über die Natur der Fraunhoferschen Linien noch zu wenig erforscht, als daß eine Bearbeitung des noch unbekannten Gebietes, wie sie Herschel und Talbot ahnten, damals der Gelehrtenwelt zeitgemäß erschienen wäre.

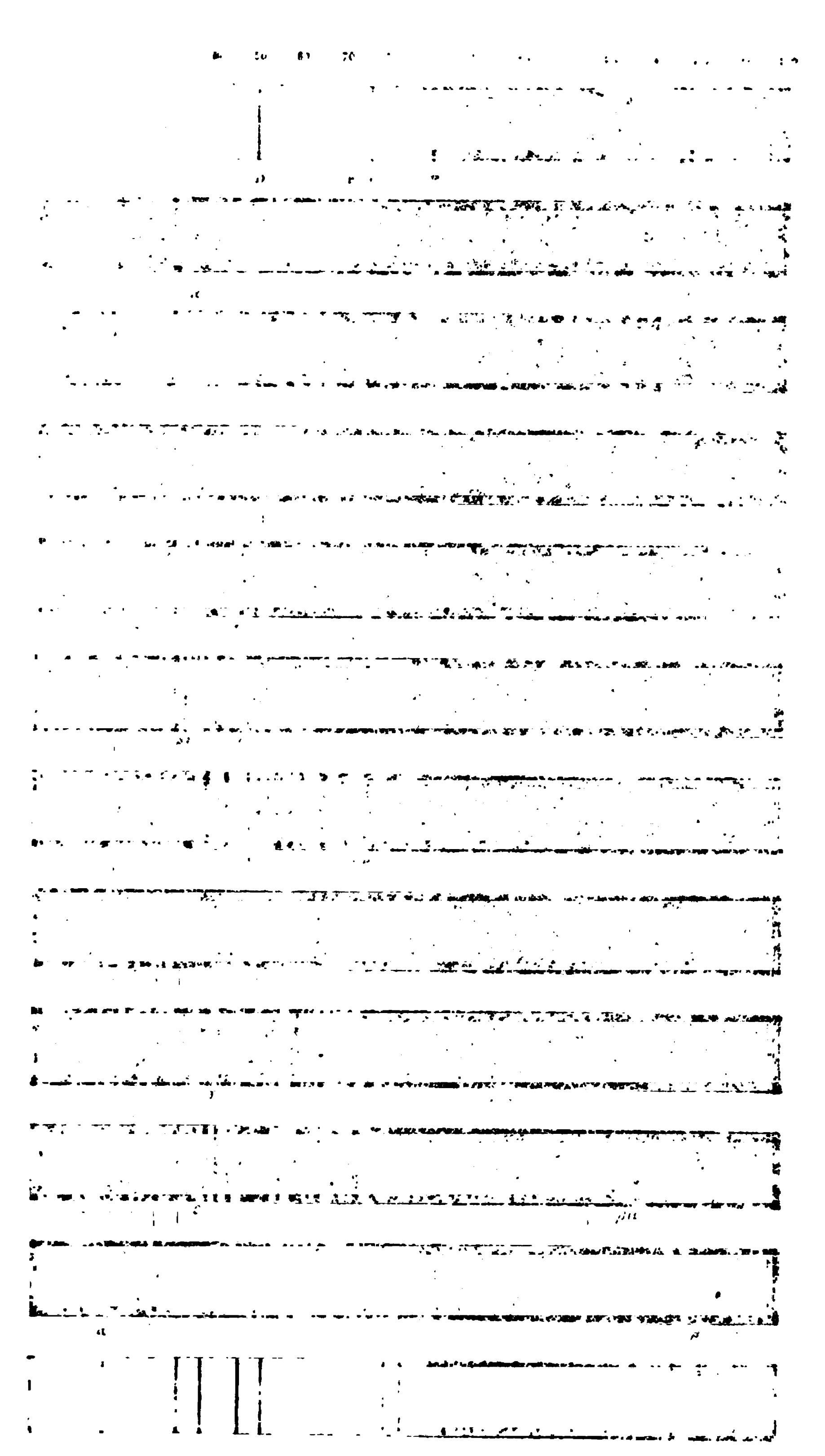
Woher entstanden die Fraunhoferschen Linien? An den Stellen, wo sie auftraten, fehlten offenbar die Lichtstrahlen. Aber waren dieselben in der Lichtquelle gar nicht vorhanden, oder waren sie bei der Fortpflanzung durch den Äther, in der Atmosphäre verloren gegangen? Fast schien das letztere der Fall zu sein, denn Brewster bemerkte 1832, daß gewisse Linien erst oder wenigstens mit viel größerer Schärfe hervortreten, wenn die Sonne tief am Horizonte steht und ihre Strahlen einen längeren Weg durch die Luft-

schichten durchlaufen müssen. Allein die abweichenden Spektra verschiedener Flammen, die Entdeckung **Wollastons** (1835), daß der elektrische Funke andere Linien zeige, je nachdem er zwischen Elektroden von Quecksilber, oder von Zink, Zinn, Kadmium und anderen Metallen überspringt, daß diese Linien demnach in der Art der Lichtquelle ihre Ursache haben mußten; ferner der Umstand, daß nur einzelne Linien durch die Atmosphäre sich beeinflußt zeigten: alles dies zwang zu der Annahme, daß die den Lücken im Spektrum entsprechenden Strahlen ursprünglich in der Lichtquelle vorhanden sein müßten. Diese Annahme, insbesondere die zuerst von Fraunhofer und nach ihm von vielen anderen Forschern gefundene Thatsache, daß die gelben Natriumlinien genau an derselben Stelle des Spektrums liegen, wo das Sonnenspektrum die von Fraunhofer mit D bezeichneten dunklen Linien aufweist, ist zur Grundlage der Spektralanalyse geworden, durch deren Ausbildung die Namen der beiden Heidelberger Naturforscher **Bunsen** und **Kirchhoff** eine solche Berühmtheit erlangt haben.

Wir dürfen bei der geschichtlichen Betrachtung des Verlaufes dieser genialen und epochemachenden Entdeckung nicht die Wollastonsche Beobachtung vergessen, daß, wenn der elektrische Funke zwischen zwei verschiedenen Metallen überspringt, das Spektrum die Linien beider Metalle zugleich zeigt; ebensowenig, daß **Foucault**, nachdem Fraunhofer die örtliche Übereinstimmung der beiden Natriumlinien mit den Linien D des Sonnenspektrums dargethan, die Entdeckung gemacht hatte (1849), daß bei elektrischem Licht, welches wegen Verunreinigung der Kohlenspitzen die beiden gelben Natriumlinien zeigte, im Spektrum an Stelle dieser hellen Linien eine intensiv schwarze Linie auftrat, als man Sonnenlicht durch den elektrischen Lichtbogen hindurchgehen ließ. Lichtwellen gleicher Brechbarkeit hoben sich also hier scheinbar gegenseitig in ihrer Wirkung auf, Licht wurde scheinbar durch Licht zerstört, und man konnte fragen, ob man es hier mit einem Vorgange zu thun habe, wie bei der Interferenz zweier Wasserwellen, wenn dieselben so verlaufen, daß die Thäler der einen Welle mit den Bergen der anderen zusammenfallen, sich in ihren Wirkungen also aufheben. So ist der Vorgang nicht zu deuten, das Auftreten der intensiv schwarzen Linie ist nicht der Auslöschung der hellen Linien des Natriumdampfes zuzuschreiben, sondern der Vergrößerung der Intensität des angrenzenden Spektrums. Des Weiteren sind als Vorarbeiten für die Entdeckung der Spektralanalyse besonders hervorzuheben die Arbeiten von **van der Willigen**, **Swan**, **Stokes**, **Zantedeschi**, ferner die klassischen Versuche, die **Plücker** in Bonn über die absorbierende Kraft verschiedener Gasarten veröffentlichte, endlich diejenigen von **Ångström**, welcher nahe daran war, den Schatz zu heben. **Euler** hatte schon vor einem Jahrhundert in seiner „Theoria lucis et caloris“ ausgesprochen, daß ein jeder Körper Licht von solcher Wellenlänge absorbiert, in welcher seine kleinsten Teilchen selbst oscillieren. Durch die neuen Entdeckungen schien dieser Satz Bestätigung zu finden, und Ångström stellte 1853 das Gesetz auf, daß die Lichtstrahlen, welche ein glühendes Gas aussendet, ganz dieselbe Brechbarkeit haben wie diejenigen, welche von ihm absorbiert werden können.

Kirchhoff und **Bunsen**, der erstere Professor der Physik, der andere Professor der Chemie in Heidelberg, brachten endlich die Untersuchungen zu einem glänzenden Abschluß, indem sie die Beobachtungen sammelten und auf eine früher wohl geahnte und angedeutete, aber in ihrer großen Bedeutung nicht klar erkannte Methode bezogen. Unberücksichtigt ließen sie nur, daß die Temperatur bei der Emission und Absorption dieselbe sein muß.

Um sich von der durch Fraunhofer entdeckten Koincidenz der hellen Natriumlinie und der dunklen D-Linie im Spektrum zu überzeugen, stellte Kirchhoff vor den mit schwachem Sonnenlicht beleuchteten Spalt seines Spektralapparates eine Natriumflamme, und siehe da, genau an der Stelle der D-Linien erschienen die beiden hellen Natriumlinien. Als er hierauf den Spalt intensiver mit dem Sonnenlicht beleuchtete, erschien zu seiner Verwunderung die D-Linie viel schwärzer als ohne die Natriumflamme. Letztere mußte also aus dem Sonnenlichte Licht von der Wellenlänge der D-Linie absorbiert haben, was sie selber aussendet. Daß dies thatsächlich richtig war, ergab ein zweiter Versuch, bei welchem das Sonnenlicht durch Drummondsches Kalklicht ersetzt wurde; auch dann erschien



Spektraltafel.

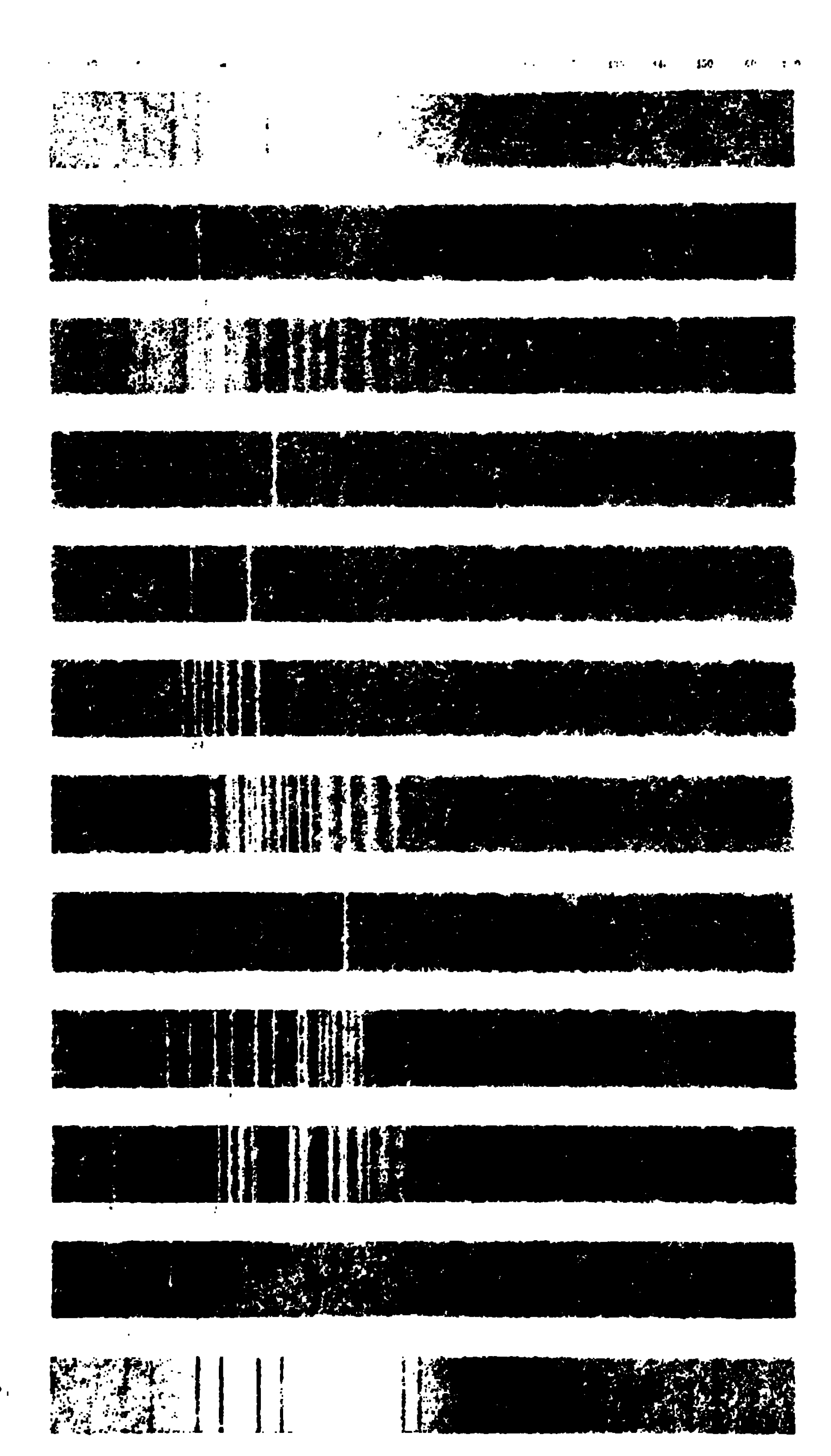
Skale von Bunsen und Kirchhoff.

schichten durchlaufen müssen. Allein die abweichenden Spektra verschiedener Flammen, die Entdeckung Wollastons (1835), daß der elektrische Funke andere Linien zeige, je nachdem er zwischen Elektroden von Quecksilber, oder von Zink, Zinn, Kadmium und anderen Metallen überspringt, daß diese Linien demnach in der Art der Lichtquelle ihre Ursache haben mußten; ferner der Umstand, daß nur einzelne Linien durch die Atmosphäre sich beeinflußt zeigten: alles dies zwang zu der Annahme, daß die den Lücken im Spektrum entsprechenden Strahlen ursprünglich in der Lichtquelle vorhanden sein müßten. Diese Annahme, insbesondere die zuerst von Fraunhofer und nach ihm von vielen anderen Forschern gefundene Thatsache, daß die gelben Natriumlinien genau an derselben Stelle des Spektrums liegen, wo das Sonnenspektrum die von Fraunhofer mit D bezeichneten dunklen Linien aufweist, ist zur Grundlage der Spektralanalyse geworden, durch deren Ausbildung die Namen der beiden Heidelberger Naturforscher Bunsen und Kirchhoff eine solche Berühmtheit erlangt haben.

Wir dürfen bei der geschichtlichen Betrachtung des Verlaufes dieser genialen und epochemachenden Entdeckung nicht die Wollastonsche Beobachtung vergessen, daß, wenn der elektrische Funke zwischen zwei verschiedenen Metallen überspringt, das Spektrum die Linien beider Metalle zugleich zeigt; ebensowenig, daß Foucault, nachdem Fraunhofer die örtliche Übereinstimmung der beiden Natriumlinien mit den Linien D des Sonnenspektrums dargethan, die Entdeckung gemacht hatte (1849), daß bei elektrischem Licht, welches wegen Verunreinigung der Kohlenspitzen die beiden gelben Natriumlinien zeigte, im Spektrum an Stelle dieser hellen Linien eine intensiv schwarze Linie auftrat, als man Sonnenlicht durch den elektrischen Lichtbogen hindurchgehen ließ. Lichtwellen gleicher Brechbarkeit hoben sich also hier scheinbar gegenseitig in ihrer Wirkung auf, Licht wurde scheinbar durch Licht zerstört, und man konnte fragen, ob man es hier mit einem Vorgange zu thun habe, wie bei der Interferenz zweier Wasserwellen, wenn dieselben so verlaufen, daß die Thäler der einen Welle mit den Bergen der anderen zusammenfallen, sich in ihren Wirkungen also aufheben. So ist der Vorgang nicht zu deuten, das Auftreten der intensiv schwarzen Linie ist nicht der Auslöschung der hellen Linien des Natriumdampfes zuzuschreiben, sondern der Vergrößerung der Intensität des angrenzenden Spektrums. Des Weiteren sind als Vorarbeiten für die Entdeckung der Spektralanalyse besonders hervorzuheben die Arbeiten von van der Willigen, Swan, Stokes, Zantedeschi, ferner die klassischen Versuche, die Plücker in Bonn über die absorbierende Kraft verschiedener Gasarten veröffentlichte, endlich diejenigen von Ångström, welcher nahe daran war, den Schatz zu heben. Euler hatte schon vor einem Jahrhundert in seiner „Theoria lucis et caloris“ ausgesprochen, daß ein jeder Körper Licht von solcher Wellenlänge absorbiert, in welcher seine kleinsten Teilchen selbst oscillieren. Durch die neuen Entdeckungen schien dieser Satz Bestätigung zu finden, und Ångström stellte 1853 das Gesetz auf, daß die Lichtstrahlen, welche ein glühendes Gas aussendet, ganz dieselbe Brechbarkeit haben wie diejenigen, welche von ihm absorbiert werden können.

Kirchhoff und Bunsen, der erstere Professor der Physik, der andere Professor der Chemie in Heidelberg, brachten endlich die Untersuchungen zu einem glänzenden Abschluß, indem sie die Beobachtungen sammelten und auf eine früher wohl geahnte und angedeutete, aber in ihrer großen Bedeutung nicht klar erkannte Methode bezogen. Unberücksichtigt ließen sie nur, daß die Temperatur bei der Emission und Absorption dieselbe sein muß.

Um sich von der durch Fraunhofer entdeckten Koincidenz der hellen Natriumlinie und der dunklen D-Linie im Spektrum zu überzeugen, stellte Kirchhoff vor den mit schwachem Sonnenlicht beleuchteten Spalt seines Spektralapparates eine Natriumflamme, und siehe da, genau an der Stelle der D-Linien erschienen die beiden hellen Natriumlinien. Als er hierauf den Spalt intensiver mit dem Sonnenlicht beleuchtete, erschien zu seiner Verwunderung die D-Linie viel schwärzer als ohne die Natriumflamme. Letztere mußte also aus dem Sonnenlichte Licht von der Wellenlänge der D-Linie absorbiert haben, was sie selber aussendet. Daß dies thatsächlich richtig war, ergab ein zweiter Versuch, bei welchem das Sonnenlicht durch Drummondsches Kalklicht ersetzt wurde; auch dann erschien

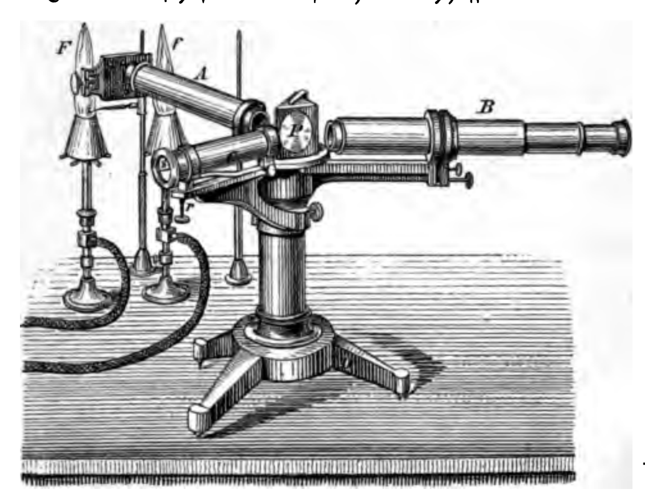


Spektraltafel.

Skala von Bunsen

auf dem kontinuierlichen Spektrum desselben genau an der Stelle der hellen gelben Linien eine intensiv schwarze Linie.

Ein weiterer Versuch mit Lithiumdampf, dessen Spektrum eine scharfe rote Linie zeigt, ergab das nämliche Resultat. Fiel intensives Sonnenlicht auf den Spalt des Spektralapparates, vor welchem eine Lithiumflamme aufgestellt war, so erschien genau an der Stelle der hellen roten Linie im Spektrum eine intensiv schwarze. Auf Grund dieser Thatsachen, welche den sogenannten Kirchhoffschen Umkehrungsversuch bilden, konnte G. Kirchhoff 1860 das fruchtbare Gesetz aufstellen und auf mathematischem sowohl, wie auf experimentellem Wege begründen: „Das Verhältnis zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen einer und derselben Strahlengattung ist für alle Körper bei derselben Temperatur dasselbe.“ Dies ist das Fundamentalgesetz für die Spektralanalyse, denn es ergibt sich aus demselben, daß jedes Gas oder jeder Dampf dieselben Lichtstrahlen absorbiert oder schwächt, welche von ihm selbst im glühenden Zustande ausgesendet werden; aus seiner Anwendung ergeben sich die merkwürdigsten Resultate für die chemische Analyse, für die Auffindung neuer Elemente und für die physikalische Astronomie. In Gemeinschaft mit Bunsen hat Kirchhoff unter anderem auch den Einfluß untersucht, welchen verschiedene Temperaturen der Flamme auf das Spektrum ausüben, und auch auf diesem Gebiete überraschende Ergebnisse erhalten.



387. Das Kirchhoff-Bunsensche Spektroskop.

Spektralapparate. Wir wollen zunächst den Apparat, dessen man sich zu bequemer Beobachtung und Untersuchung der Flammenspektra bedienen kann, beschreiben, und beziehen uns dabei auf Abb. 387 u. 388, die uns denselben in einer einfachen, von Bunsen angegebenen Form darstellen. Ein starker Dreifuß D trägt eine eiserne Platte, auf welcher das Prisma P befestigt ist. An der Säule des Dreifußes sind drei um die Zentralachse drehbare Arme angebracht, die das Spalt- oder Kollimatorrohr A, das Beobachtungsfernrohr B und das Skalenrohr C tragen. Das Spaltrohr ist an seinem vorderen Ende mit einem mikrometrisch verstellbaren Spalt, an seinem hinteren Ende mit einer Linse versehen, deren Brennweite gleich der Länge des Rohres A ist, so daß die vom Spalt auf sie fallenden Strahlen hinter der Linse parallel austreten. Das Prisma ist auf seinem Tischchen so befestigt, daß es sich in seiner Minimumstellung befindet, daß also die auf dasselbe auffallenden parallelen Strahlen am wenigsten abgelenkt werden. Die durch das Prisma gebrochenen Strahlen gelangen nun in das Beobachtungsfernrohr B. Die am Ende desselben befindliche Objektivlinse entwirft in der Entfernung ihrer Brennweite das Spektrum, welches mit dem am vorderen Ende befindlichen Okular beobachtet wird. Das Skalenrohr C dient dazu, bestimmte Stellen im Spektrum zu fixieren. Zu diesem Zwecke ist es an seinem Ende mit einer Glasplatte versehen, auf welcher sich eine, durch eine Flamme zu beleuchtende, mikrometrische Teilung befindet. Die von der geteilten Fläche ausgehenden Strahlen werden durch die am anderen Ende des Skalenrohres befindliche Linse parallel gemacht, fallen auf die Vorderfläche des Prismas und werden von dieser in das Beobachtungsfernrohr hinein reflektiert, so daß der durch das Fernrohr blickende Beobachter gleichzeitig das Spektrum und die Teilung sieht und in letzterer ein Mittel zur Orientierung im Spektrum, resp. zur Messung besitzt. Man pflegt nach dem Vorgange

von Bunsen das Skalenrohr so einzustellen, daß die D-Linie des Sonnenspektrums mit dem Teilstriche 50 der Skala zusammenfällt. Vor dem Spalte des Spaltrohres sehen wir die Lichtquelle F, einen sogenannten Bunsenschen Brenner; in dem unteren Teile desselben mischt sich das zugeleitete Leuchtgas mit atmosphärischer Luft. Dieses Gemisch leuchtet wenig, entwickelt aber eine hohe Temperatur und bringt die mittels eines Platindrahtes in die Flamme eingeführten Substanzen zur Verdampfung. Die Strahlen der Flamme dringen durch den engen Spalt in das Spaltrohr und gelangen in dem vorhin geschilderten Verlaufe in das Beobachtungsfernrohr.

Dieser Apparat hat für viele Zwecke in seiner wenig kompendiösen Form mancherlei Unbequemes; daher sind von den Physikern und Mechanikern sehr bald Vervollkommnungen angegeben und viele zur Messung und zur Vergleichung der Spektra dienende Hilfsapparate konstruiert worden. Um die Dispersion oder die zerstreuende Wirkung zu verstärken, läßt man die Lichtstrahlen durch zwei und mehrere Prismen hindurchgehen. Ein solches Arrangement zeigt der nach Kirchhoffs Angaben von dem berühmten Optiker Steinheil in München ausgeführte Originalapparat, mit Hilfe dessen Kirchhoff eine genaue Zeichnung des Sonnenspektrums in großem Maßstabe ausführte (Abb. 389). Derselbe besitzt vier Prismen, von denen drei einen brechenden Winkel von 45° haben, das vierte einen von 60° besitzt, und welche auf kleinen, mit je drei Stellschrauben versehenen Tischchen ruhen, so daß sie auf der starken eisernen Grundplatte G mit ihren Flächen genau senkrecht zu den Achsen der Fernrohre gestellt werden können. Das Kollimatorrohr A trägt an seinem vorderen Ende die Spaltvorrichtung, B ist das Fernrohr, durch welches das Spektrum beobachtet wird. Es ist auf seiner Unterlage mittels der Mikrometerschraube R drehbar, um die Winkelabstände der einzelnen Linien messen zu können. Browning in London, der sich durch die Herstellung ausgezeichneter, spektroskopischer Apparate einen berühmten Namen gemacht hat, hat sogar bei einem für die Sternwarte in Kiew von ihm konstruierten Spektroskop neun Prismen angewandt. Abb. 391 zeigt den Gang, den die Lichtstrahlen durch deren Zwischenschaltung zu nehmen gezwungen werden. Einen ähnlichen ausgezeichneten, von Schröder in Hamburg konstruierten Spektralapparat besitzt das Astrophysikalische Observatorium zu Potsdam.


388. Das Kirchhoff-Bunsensche Spektroskop von oben gesehen.



389. Kirchhoffs Spektralapparat von Steinheil.

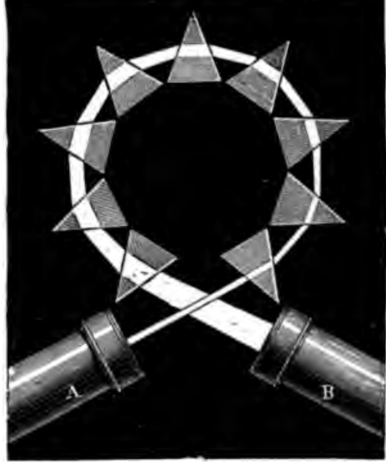
Bei der Benutzung solcher Spektralapparate mit mehreren Prismen tritt eine Schwierigkeit und Fehlerquelle auf, welche bei den Apparaten mit einem Prisma nur in geringem Maße vorhanden ist. Bei letzteren ist nämlich das Prisma auf das Minimum der Ablenkung für eine mittlere Farbe des Spektrums fest eingestellt, und diese Einstellung ist für alle Farben genügend genau, da die Verschiedenheit ihrer Ablenkungen nur gering ist. Handelt es sich aber um so große Dispersionen, wie sie bei Anwendung mehrerer Prismen auftreten, so müssen die Prismen beim Übergange von einer Farbe auf eine andere einzeln nach einander auf das Minimum für diese Farbe eingestellt werden, und dies ist eine sehr schwierige und mühsame Arbeit. Man hat daher in neuerer Zeit Spektralapparate konstruiert, welche mit einer Vorrichtung versehen sind, die es ermöglicht, auf automatischem Wege stets alle Prismen zugleich auf das Minimum der Ablenkung beim Übergange von einer Farbe zur anderen einzustellen. Ein solcher von der Firma Schmidt und Haensch in Berlin konstruierter Spektralapparat mit vier Rutherfordschen Prismen ist in Abb. 392 perspektivisch dargestellt, während Abb. 393 den Mechanismus für die automatische Einstellung auf das Minimum von oben gesehen zeigt.



390. Karl August Steinheil.

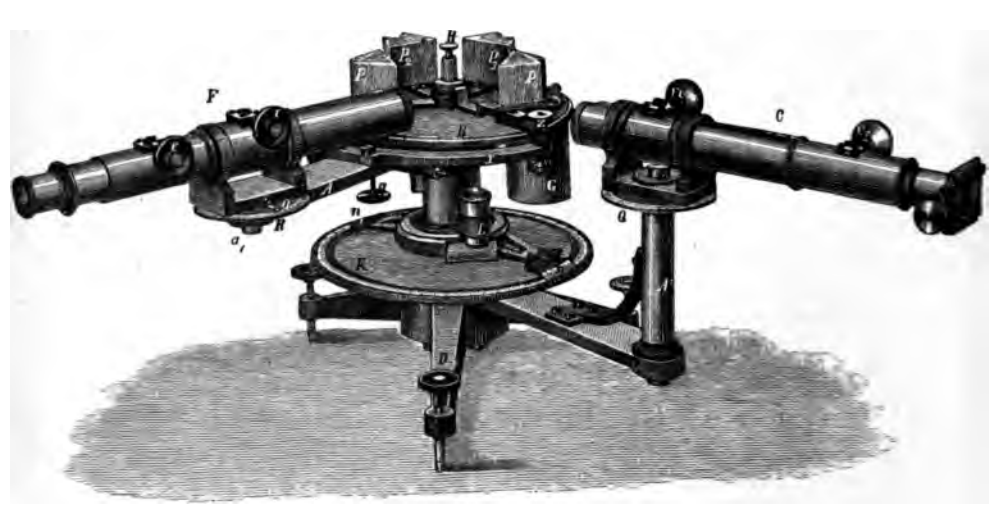
Beobachtungsfernrohr F und Kollimatorrohr C, welche durch die Triebe r und r_1 eingestellt werden können, ruhen auf den um die Zentralachse des Instrumentes drehbaren Armen A und A'. Die Drehung des Fernrohrs wird mittels des sich gleichzeitig mit dem Arm A bewegenden Doppelnonius n an dem geteilten Kreise K durch die Lupe L abgelesen. Fernrohr und Kollimatorrohr sind ferner um die auf den Tragarmen A und A' befindlichen vertikalen Achsen a und a_1 drehbar, und die Drehungen können mittels der Indices o und o_1 an den geteilten Kreisen R und Q abgelesen werden. Als Prismen sind sogenannte Rutherfordsche angewandt; sie bestehen aus rechtwinkeligen Prismen, an welche zwei kleine spitze Prismen von geringer Dispersion, aber starker Ablenkung in umgekehrter Stellung angekittet sind. Dadurch wird bei einem geringen Verluste an Dispersion die Ablenkung stark vermindert und die Anwendung vieler Prismen hinter einander ermöglicht. Die Prismen ruhen auf der Grundplatte B. Die radialen Arme b_1, b_2, b_3, b_4, welche um die Hauptachse drehbar sind, tragen Querstücke, die in radialer Richtung in Schlitzen unter den Prismen verschiebbar und durch die Schrauben s mit einander verbunden sind. Die erste Schraube s kann sich in einem radialen Schlitze der Grundplatte B verschieben, während die letzte Schraube s in dem Arme b_4 verschiebbar befestigt ist, welcher durch Schraube z und den kreisförmigen Bügel x mit dem Fernrohrlager in Verbindung steht, so daß, wenn das Fernrohr um die Hauptachse um einen Winkel gedreht wird, die Arme b samt den Prismen gezwungen werden, sich um einen gleichen Winkel zu drehen derart, daß sie stets im Minimum der Ablenkung für die in das Fernrohr gelangenden Strahlen bleiben. Die Prismen lassen sich durch Lösen der Schraube t leicht entfernen, so daß man je nach Belieben mit einem, mit zwei oder mehr Prismen arbeiten kann. Die Dispersion bei Anwendung eines Prismas beträgt 11°, bei Anwendung von vier Prismen 44°. Große Dispersion läßt sich bei einer geringen Anzahl von Prismen erzielen

durch Anwendung von Flüssigkeitsprismen. Bei der von Tollon angegebenen Konstruktion, welche aus der Kombination eines Schwefelkohlenstoffprismas mit einem entgegengesetzt gestellten Crownglasprisma besteht, ist die Dispersion etwa sechsmal so groß, bei der von Wernicke angegebenen Kombination, Zimtsäure-Äthyläther und Crownglas mehr als dreimal so groß, wie bei einem Flintglasprisma von 60°.



891. Gang der Lichtstrahlen durch neun Prismen.

Diffraktionsgitter. In neuerer Zeit ist man von der Anwendung von Spektrometern mit mehreren Prismen zurückgekommen, besonders, seitdem es gelungen ist, Diffraktionsgitter von sehr großer Dispersion und außerordentlicher Schärfe herzustellen. Vor den durchsichtigen Glasgittern, welche die Teilung auf der einen Fläche einer planparallelen Glasplatte besitzen, verdienen und genießen die Reflexionsgitter, welche die Teilung auf einer reflektirenden Metallfläche besitzen, bei weitem den Vorzug. Die Gitterspektra haben im Gegensatze zu den Prismenspektren die wichtige Eigenschaft, welche sie hauptsächlich zu absoluten Wellenlängenbestimmungen geeignet macht, daß die Winkelablenkungen der verschiedenen Strahlen des Spektrums proportional mit deren Wellenlängen zunehmen. Stellt man ein Glasgitter so vor das Kollimatorrohr, daß seine Striche parallel dem Spalte liegen, und daß die geteilte Fläche genau normal zu den optischen Achsen des Kollimator- und des Beobachtungsrohres und



892. Spektralapparat von Schmidt und Haensch in Berlin.

dem letzteren zugewandt ist, so wird das von dem beleuchteten Spalte ausgehende Licht, wie wir im ersten Kapitel bereits sahen, nach dem Durchgange durch das Gitter in eine Reihe von Spektren zerlegt, deren Ausdehnung immer mehr zunimmt, je weiter sie abgelenkt sind, und deren Lichtintensität gleichzeitig abnimmt. Ist das Gitter planparallel und genau justiert, so liegen die Spektra der verschiedenen Ordnungen völlig symmetrisch zu beiden Seiten der Kollimatorrichtung, in welcher man das direkte nicht gebeugte Bild des Spalts erblickt, und man erhält die Wellenlänge λ eines beliebigen Lichtstrahls, wenn b die Entfernung zweier Gitterstriche und δ die gemessene Ablenkung der gebeugten Strahlen links oder rechts von der Richtung der auffallenden Strahlen bedeutet, durch die einfache Beziehung $\lambda = b \sin \delta$.

Bei den Metallgittern kann natürlich nicht hindurchgehendes Licht zur Erzeugung des Beugungsspektrums benutzt werden, sondern man läßt das Licht vorn auf das Gitter auffallen und beobachtet das von ihm reflektierte Licht, welches ebenfalls bei richtiger Justierung neben dem unabgelenkten und nicht dispergierten Strahl auf beiden Seiten symmetrisch eine Reihe von Spektren liefert, für welche dieselben Gesetze gelten, wie für die Glasgitterspektren.

Was die Herstellung der Gitter betrifft, so wurden die ersten Gitter von Fraunhofer angefertigt, indem er gleichmäßig dünne Drähte in sehr kleinen gleichen Zwischenräumen parallel neben einander ausspannte, oder ebene Glasplatten mit Ruß überzog und dann in den Ruß feine Linien einritzte. Feine Gitter lassen sich aber auf diese Weise nicht herstellen; Glasgitter von hoher Vollkommenheit sind dann später durch Nobert angefertigt worden, welchem es mittels einer vorzüglichen Teilmaschine und einem Reißer aus Diamant gelang, 4000 gleichmäßig feine Linien auf die Breite eines Zentimeter zu ziehen. Zur Herstellung so feiner Teilungen ist zweierlei erforderlich: erstens eine vollkommene Mikrometerschraube für die Bewegung des Reißerwerks, und zweitens ein guter Diamant mit geeigneter feiner Spitze, der durch das Ziehen von Tausenden von Strichen nicht abgenutzt wird. Es ist ebenso schwierig, wie selten, aus Dutzenden scheinbar guter Diamanten einen ausfindig zu machen, welcher jener durchaus notwendigen Anforderung genügt. In der neueren Zeit ist die Technik in der Herstellung von Gittern, besonders von Metallgittern, so weit vorgeschritten, daß die von ihnen erzeugten Spektra an Schärfe und an Trennungsfähigkeit die durch Prismen erzeugten bei weitem übertreffen, so daß man sich, namentlich für die Beobachtung lichtstarker Spektren fast ausschließlich der Metallgitter (aus Spiegelmetall) bedient.



398. Spektralapparat von Schmidt und Haensch in Berlin, von oben gesehen.

Als Verfertiger von ausgezeichneten Gittern sind zu nennen Wanschaff in Berlin, Rutherford und Brashear in Nordamerika. An Leistungsfähigkeit werden sie aber alle übertroffen von den in neuester Zeit von Professor Rowland in Baltimore hergestellten Konkav-Metallgittern, welcher die sinnreiche und glückliche Idee hatte, die Teilung auf konkav gekrümmten Flächen von großem Radius auszuführen. Diese Anordnung ist von ganz besonderem Vorteil für die Herstellung von Spektralphotographieen, indem durch das Konkavgitter selbst ein reelles Bild des Spektrums ohne Zwischenschaltung einer Linse erzeugt wird.

Mittels eines solchen Konkavgitters sind von Professor Rowland auf photographischem Wege die an Schärfe und Ausführlichkeit seitdem unübertroffenen Spektraltafeln hergestellt worden, welche den von der John Hopkins-Universität im Jahre 1888 herausgegebenen Atlas des Sonnenspektrums bilden. Dieselben enthalten auf zehn Blättern 20 Originalphotographieen von Teilen des Gitterspektrums von je 89 cm Länge und 8,3 cm Höhe, so daß also das Gesamtspektrum eine Ausdehnung von etwa 18 m hat.

Spektroskope à vision directe. Derartige Instrumente sind für die feinere wissenschaftliche Untersuchung notwendig; für viele Fälle genügt aber schon ein Apparat, bei welchem ein nicht so hoher Grad von Genauigkeit bei der Messung beansprucht wird,

wofern nur seine Handhabung eine leichte und bequeme ist. Bei der Untersuchung solcher Spektra, welche nicht von einem konstanten, festen, leuchtenden Punkte geliefert werden, wirkt häufig der Umstand, daß die Einfallsrichtung des Strahles und die Sehrichtung des Fernrohres einen Winkel mit einander bilden, insofern störend, als dadurch die rasche Einstellung des Apparates gehindert wird, und manche nur momentan oder nur auf kurze Zeit aufleuchtende Phänomene, wie Sternschnuppen, entweder gar nicht oder nur sehr schwer damit zu untersuchen sein würden. Man hat sich daher bemüht, Spektralapparate zu konstruieren, welche gestatten, den Lichtstrahl in derselben Richtung, wie er einfällt, zu untersuchen, sogenannte geradsichtige Spektroskope (à vision directe). Amici war der erste, welcher im Jahre 1860 dies Problem löste.



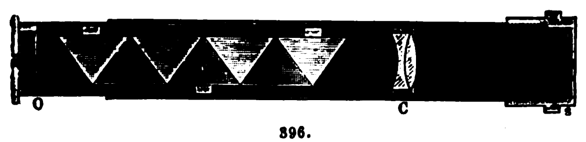
394. Janssens geradsichtiges Prismensystem.

Es ist schon erwähnt worden — und wir werden Gelegenheit haben, bei der Besprechung der achromatischen Linsen etwas genauer auf diesen Gegenstand einzugehen — daß die Ablenkung der Lichtstrahlen und die Zerstreuung (Dispersion) des Spektrums für Prismen von verschiedenen Glassorten verschieden sind. Ein Flintglasprisma gibt bei



395. Taschenspektroskop von Prof. H. W. Vogel.

gleich großer Ablenkung der mittleren Strahlen ein Spektrum, welches viel mehr in die Länge gezogen ist als das Spektrum, das von einem Crownglasprisma hervorgerufen wird. Wenn man also ein Flintglasprisma mit einem entsprechend geschliffenen Crownglasprisma in umgekehrter Lage so kombiniert, daß das eine die Ablenkung des anderen wieder aufhebt, so werden die Strahlen nach ihrem Durchgang durch die Prismenkombination zwar in der Einfallsrichtung weitergehen; sie werden aber, da die Dispersion nicht ebenso vollständig aufgehoben worden ist, immer noch zerstreut bleiben und bei ihrem



396.

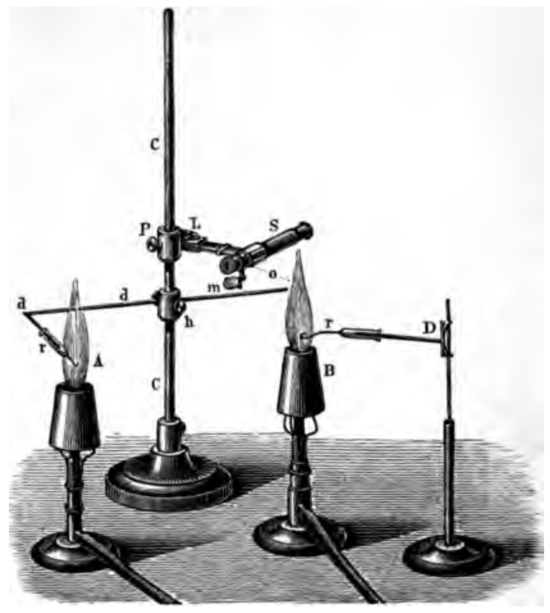
Austritt ein Spektrum, wenn auch von geringerer Breite als das ursprüngliche, bilden. Durch Aneinanderfügung mehrerer solcher Prismenpaare kann man nun die zerstreuende Kraft vermehren, und die Instrumente, welche Amici, Janssen in Paris und Browning in London konstruiert haben, sind nach diesem Prinzip eingerichtet, welches durch Abb. 394 versinnbildlicht wird. Browning hat Taschenspektroskope in den Handel gebracht, deren Länge nicht mehr als 8 cm beträgt, die man wie ein kleines Fernrohr direkt auf den leuchtenden Punkt richtet und sehr bequem zur spektroskopischen Untersuchung der Sternschnuppen benutzen kann. Dieselben enthalten ein System von sieben Prismen, Kollimatorlinse und Beobachtungsfernrohr, wie die größeren Apparate.

Abb. 395 stellt ein Browningsches, von H. W. Vogel modifiziertes Taschenspektroskop dar, dessen Benutzung wegen seiner leichten Einstellbarkeit und seiner Lichtstärke recht bequem ist.

Der Spalt wird durch Drehen des Kopfes bei s (Abb. 396) enger oder weiter gemacht. Zur Einstellung richtet man, indem man den Spalt eng stellt, das Instrument

auf den Himmel und zieht das Hinterende mit den Prismen so weit aus, bis man durch O sehend, die Fraunhoferschen Linien deutlich erkennt.

B (Abb. 395) ist eine abnehmbare Metallkappe mit einer rechteckigen Öffnung, durch welche direkt Licht auf den Spalt T fällt. Außerdem enthält die Kappe noch eine seitliche Öffnung O, durch welche das von dem kleinen drehbaren Spiegel m reflektierte Licht auf das Spiegelprisma P fällt, um von diesem in den oberen Teil des Spaltes geworfen zu werden. Man erhält so zwei Spektren über einander, das eine direkte zur Beobachtung, das andere zur Vergleichung. Der Spiegel m mit seinem Bügel g sitzt an einem um die Achse des Instrumentes drehbaren Metallring x, so daß er ganz beiseite gedreht werden kann. Der drehbare Ring D dient zur Veränderung der Spaltweite. Das Prisma P sitzt an einem kleinen Hebel h, so daß es, wenn erforderlich, seitwärts gebracht und der ganze Spalt frei gemacht werden kann.



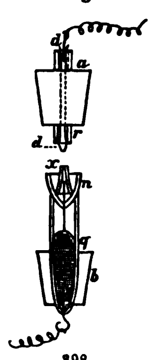
397. Anordnung des Taschenspektroskops.

Abb. 397 zeigt das Instrument in Anwendung zur Beobachtung von Flammen. Das Taschenspektroskop S ist in eine Klemme L gespannt, die um eine horizontale Achse drehbar ist und sich mittels des Ringes P an der Säule C hoch und niedrig stellen läßt.

Ein zweiter, stellbarer Ring h trägt einen verschiebbaren, langen, rechtwinkelig gebogenen Draht d d, auf den man das Glasröhrchen mit eingeschmolzenem Platindraht r steckt, welcher die Probe trägt, die man in der Beobachtungsflamme A erhitzen will.

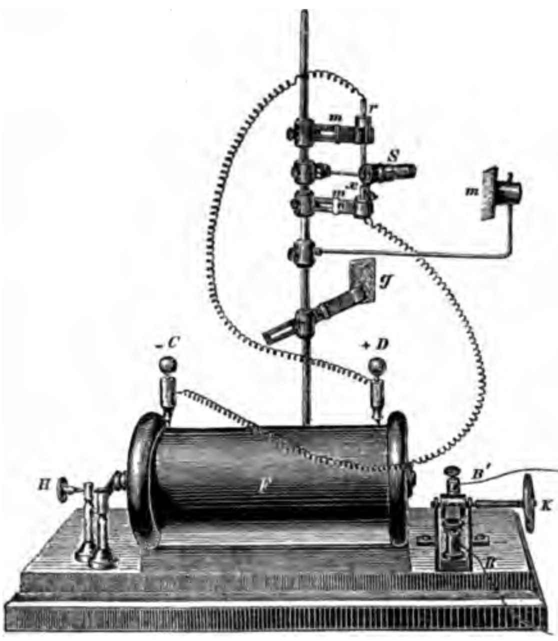
Zur Bestimmung der in der Flamme A erscheinenden Linien benutzt man eine Vergleichsflamme B, die man gegenüber der kleinen Öffnung O aufstellt, hinter welcher sich das Spiegelprisma P befindet. Statt einer Vergleichsflamme kann man auch das Sonnenspektrum zur Vergleichung benutzen, indem man durch O Tageslicht einfallen läßt.

Zur Untersuchung der Funkenspektra von Metalllösungen bedient man sich folgender Entladungsvorrichtung. Von zwei Korken a und b (Abb. 398), die in die Klemmen m m gespannt werden (Abb. 399), trägt der untere eine mit Quecksilber gefüllte Glasröhre q, in welcher ein Platindraht eingeschmolzen ist. Derselbe steht mit dem negativen Pol des Induktors F in leitender Verbindung. Die zu untersuchende Flüssigkeit füllt man auf kleine, leicht anzufertigende Glashütchen n (Abb. 398). In diese ist ein Platindraht eingeschmolzen, der in das Quecksilber des Röhrchens q taucht. Über diesen Draht stülpt man das Haarröhrchen x. Gegenüber demselben steht ein Rohr r, welches innerhalb des Korkes a sitzt, und durch welches ein umgebogener Platindraht d führt. Dieser steht mit dem positiven Pol des Induktors in leitender Verbindung. Bei Erregung des Induktors springen zwischen x und r Funken über. Nähert man dann die beiden Pole einander mittels der verschiebbaren Klemmen m m (Abb. 399), so geht der Funkenstrom in eine kontinuierliche Einladung über, wobei sich an dem negativen Pole ein blauer Lichtbüschel zeigt. — Füllt man dann mittels Pipette Metalllösung in das Hütchen n, so steigt diese durch Kapillarwirkung in das Röhrchen x empor und wird durch den Funkenstrom zersetzt. Man beobachtet nun das in der Nähe von x auftretende Funkenspektrum der Lösung.



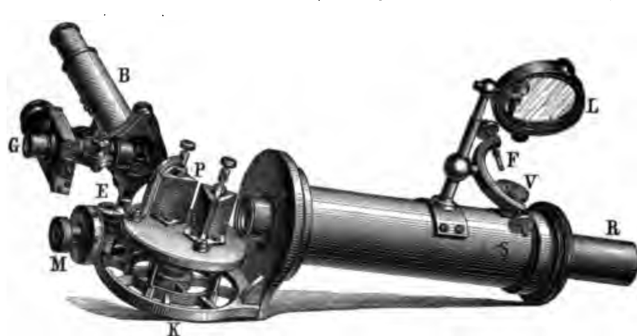
398. Entladungsvorrichtung für Funkenspektra.

Sternspektroskop. Man kann sich bei Beobachtung der Sonne infolge ihres sehr intensiven Lichtes stark zerstreuender Spektroskope bedienen; handelt es sich dagegen um das schwache Licht der Planeten, der Fixsterne oder gar der Kometen und Nebelflecke, so darf man häufig die Dispersion des Lichtes nicht zu weit treiben, weil das Spektrum sonst zu schwach wird. Man bedient sich dann des sogenannten Sternspektroskops. Unsere Abb. 400 zeigt die eine von Huggins vielfach benutzte Konstruktionsform, welche von John Browning in London für das Astrophysikalische Observatorium zu Potsdam angefertigt worden ist.*)



399. Anordnung zur Untersuchung von Funkenspektren.

An dem Kollimatorrohr S ist der Teilkreis K, der das zur Aufnahme der beiden Prismen P dienende Tischchen trägt, direkt befestigt. Die Stellung des Beobachtungsfernrohres B, welches um einen Zapfen im Zentrum des Positionskreises K drehbar ist, kann mittels eines Nonius abgelesen werden; Differentialmessungen können aber auch angestellt werden durch die Mikrometerschraube M, deren ganze Umdrehungen auf dem mit Index versehenen Scheibchen E abgelesen werden. Beim Spalte S, (welcher ebenso wie die im Rohre R befindliche, zur Verbreiterung des Spektrums dienende Cylinderlinse in der Zeichnung nicht zu sehen ist) befindet sich im Kollimatorrohre eine Öffnung, durch welche mittels des Spiegels L beliebiges Vergleichslicht auf das Vergleichsprisma des Spaltes geworfen werden kann. An demselben Arm befindet sich auch ein Funkenmikrometer, um das Licht von Induktionsfunken in das Spektroskop hineinzuwerfen. Am Beobachtungsfernrohr befindet sich noch ein sogenanntes Ghostmikrometer G, welches ermöglicht, auch bei festgestelltem Fernrohre Differentialmessungen anzustellen. Es besteht aus einem Schraubenmikrometer, hinter dessen Fadenkreuz anstatt eines Okulars sich eine kleine verschiebbare Konvexlinse befindet, welche das von den vorn beleuchteten Fäden ausgehende Licht parallel macht und durch ein kleines totalreflektierendes Prisma in das Objektiv des Beobachtungsfernrohres wirft, so daß man im Beobachtungsfernrohr die hellen Fäden auf dem Grunde des Spektrums erblickt und mit der Mikrometerschraube des Ghostmikrometers Differentialmessungen ausführen kann.



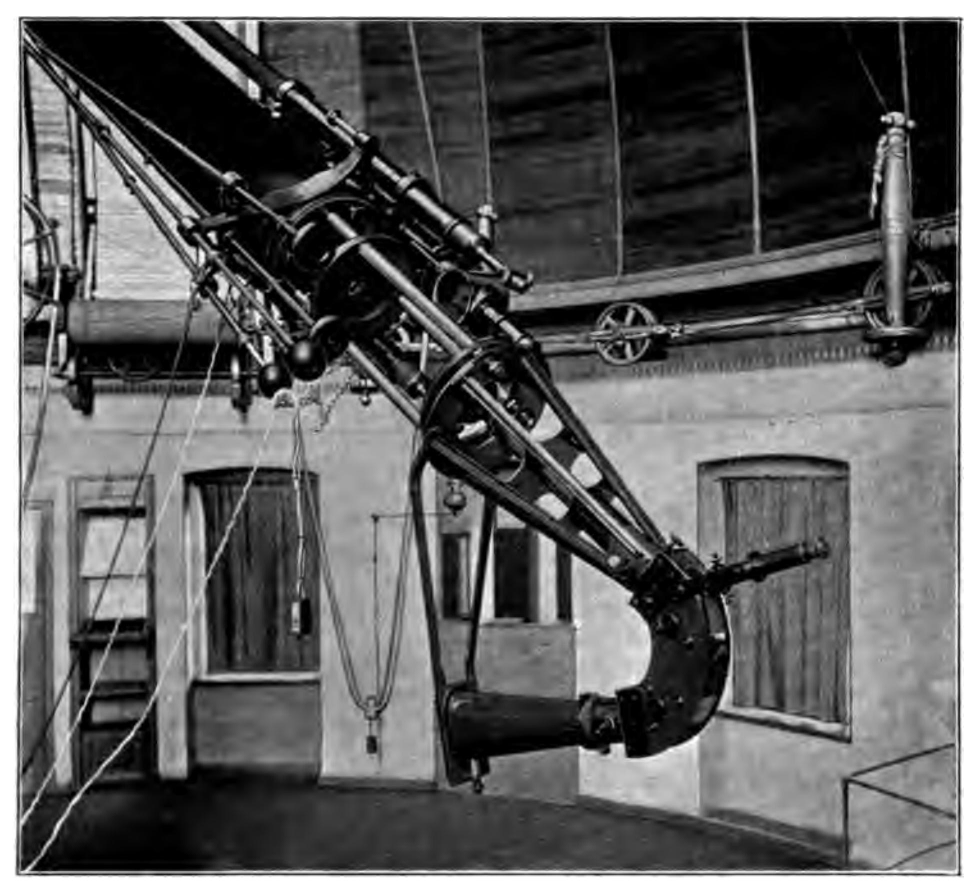
400. Sternspektroskop.

Photographische Aufnahme der Spektra der Himmelskörper. Wir müssen hier bei Beschreibung der Apparate, die uns das schwierige Studium des Spektrums er-

*) J. Scheiner, „Spektralanalyse der Gestirne“, p. 88. Wilh. Engelmann, Leipzig, 1890.

leichtern, die Anwendung der Photographie erwähnen, welche in neuester Zeit von höchster Bedeutung für dies Gebiet der Forschung geworden ist.

Die Vorteile, welche die photographische Aufnahme darbietet, bestehen beim Sonnenspektrum und anderen lichtstarken Spektren nur in der unveränderten Wiedergabe der wirklichen Lage und Stärke der Linien. Die Genauigkeit in der Ausmessung derselben wird bei der photographischen Aufnahme keine größere als bei der direkten Beobachtung durchs Fernrohr. In weit hervorragenderem Maße treten die Vorteile der photographischen Aufnahme bei lichtschwachen Spektren zu Tage, nicht etwa weil das Auge des Beobachters für geringe Lichtstärken weniger empfindlich ist, als die photographische



401 Spektrograph des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam.

Platte, sondern weil für die Platte Lichtmengen zur Wirksamkeit kommen, deren Größe von der Dauer der Exposition abhängt. Während Objekte häufig vom Auge ihrer Lichtschwäche wegen nicht wahrgenommen werden können, sammelt die photographische Platte diese geringen Lichtmengen durch lange Exposition, bis die für die Hervorbringung des Bildes erforderliche chemische Reaktion eingetreten ist. Das Auge kann in einem schmalen Spektralbande Einzelheiten nicht mehr wahrnehmen. Auf der Platte jedoch kann man jedes Detail des Streifens unter Zuhilfenahme des Mikroskopes deutlich sehen. Aus diesem Grunde kann die für die Okularbeobachtung mit Sternspektroskopen bisher übliche Cylinderlinse, welche zur Verbreiterung des Spektrums diente, aber stets eine Lichtschwächung mit sich brachte, fortgelassen und dementsprechend die Dispersion stärker gewählt werden. Daß endlich die für das Auge unsichtbaren ultravioletten Strahlen die chemisch wirksamsten sind, ist bereits hervorgehoben worden.

Huggins war der erste, welcher (1864) Sternspektra photographisch darstellte. Er hat zuerst bei seiner Untersuchung des Siriusspektrums sich mit großem Erfolge der Photographie bedient und zu seiner Überraschung in dem Spektrum neben den ihm schon bekannten drei Wasserstofflinien, H_α, H_β, H_γ, im ultravioletten Teile noch, mehrere bisher nie beobachtete, mit den Wasserstofflinien übereinstimmende Linien entdeckt.

Es möge an dieser Stelle einer der vorzüglichsten Spektrographen, nämlich der des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, kurz beschrieben werden.*) Es ist ein elfzölliger Refraktor, von welchem der Okularkopf abgenommen und durch ein starkes, eisernes, aus drei Stangen bestehendes Gestell ersetzt ist, dessen Fortsetzung der verstellbare Spektrograph bildet. Das Kollimatorrohr ist in einem festen konischen Gestell aus T-förmigen, stählernen Trägern durch Trieb- und Zahnstange beweglich, und seine Stellung kann mit Hilfe eines Maßstabes abgelesen werden. Auf das Kollimatorrohr folgt der sehr fest konstruierte Behälter für die beiden stark dispergierenden Rutherfordschen Prismen. An denselben schließt sich die konische Camera an, deren Ende durch Träger mit dem oberen Ende des Kollimatorkörpers verbunden ist. Durch diese Verbindung ist ein völlig starres, jede Durchbiegung ausschließendes System hergestellt. Ferner wird zum Zwecke der Stabilität nicht die Kammer selbst, sondern das Objektiv durch einen Trieb mit geteilter Trommel verstellt. Kollimator- und Objektivlinse sind für die chemischen Strahlen achromatisiert (s. später).

In dem Strahlenkegel des Refraktorobjektivs ist in etwa 40 cm Entfernung vom Spalt eine Geißlersche Wasserstoffröhre eingeschaltet, so daß das Sternspektrum von der H_γ-Linie durchzogen erscheint, welche als Anhalt zur Messung der Linienverschiebung infolge der Bewegung des Sternes im Visionsradius dient. Gleichzeitig wird durch die Röhre die nötige Beleuchtung zum Halten des Sternes auf dem Spalte geliefert. Derjenige Teil des vom Spalte kommenden Lichtes, welcher von der vordersten Prismenfläche reflektiert wird, gelangt durch ein im geeigneten Winkel befestigtes, auf Unendlich eingestelltes Fernrohr ins Auge, so daß man den von der Röhre erleuchteten Spalt und in demselben als feinen Lichtpunkt den Stern erblickt. Die Feinbewegung des Refraktors ermöglicht es, den Stern genau auf der Mitte des parallel zur täglichen Bewegung gestellten Spaltes zu halten. Die geringste Abweichung des Sternes von der normalen Stellung im Sinne der Spaltbreite macht sich sofort durch die Veränderung des Reflexes des Sternes an den Spalträndern bemerklich.

Zur Orientierung in der außerhalb der empfindlichen Platte liegenden Spektralregion, etwa derjenigen der b-Gruppe des Sonnenspektrums, befindet sich ein kleines, total reflektierendes Prisma nebst Okular, einerseits zur Beobachtung des grünen Teiles des Spektrums, andererseits zur Kontrolle für die Einstellung auf den Spalt.

Die außerordentlich exakten Resultate, welche mit dem Potsdamer Spektrographen erzielt worden sind, eingehender anzuführen, würde den Rahmen des Buches überschreiten. Es möge hier nur hingewiesen werden auf die Aufnahmen des Spektrums von α Orionis, dessen Vergleichung mit dem Sonnenspektrum ergibt, daß in Bezug auf die hervorragenden Liniengruppen eine vollständige Ähnlichkeit in beiden Spektren herrscht. Die Absorptionslinien in α Orionis erscheinen aber kräftiger und verwaschener als im Sonnenspektrum, so daß an denjenigen Stellen, an welchen im Sonnenspektrum deutlich getrennte Liniengruppen erscheinen, dieselben im Orionspektrum zu breiteren Bändern zusammenfließen. Die Hälfte aller Linien im Spektrum von α Orionis gehören dem Eisenspektrum an.

Man verspricht sich von der Photographie auf diesem Gebiete noch sehr viel und sucht sich nach diesen überraschenden Resultaten in der Ausbildung der Beobachtungsmethode und der Instrumente immer mehr zu vervollkommnen.

Resultate der Spektralanalyse. Dasjenige, was die Spektralanalyse auszeichnet vor allen anderen Methoden der exakten Forschung, ist eine bisher ungeahnte Empfindlichkeit, welche gleichwohl jede Täuschung bei der Untersuchung ausschließt. Nach Bunsen

---

*) J. Scheiner, l. c., p. 109.

und Kirchhoff genügt es z. B., den dreimillionten Teil eines Milligramm Kochsalz in die Flamme eines Bunsenschen Brenners zu bringen, um die Reaktion auf Natrium noch deutlich hervorzurufen. Wegen dieser außerordentlichen Empfindlichkeit erhält man die Natriumlinie fast bei jeder in freier Luft brennenden Flamme, da die Luft selten ganz frei von Kochsalzstäubchen ist. Wir finden durch das Spektroskop, daß bei Westwind sich mehr Natron in der Luft befindet als bei Nordost, weil im ersten Falle der Wind über das kochsalzhaltige Meerwasser, im zweiten aus den weiten Länderstrecken und Steppen des ungeheuren russischen Reiches zu uns kommt.

Im Verlauf der Untersuchungen, die Kirchhoff und Bunsen anstellten, mußte es sie überraschen, nicht nur daß manche Körper, die man früher für sehr selten in der Natur vorkommend angesehen hatte, sich jetzt plötzlich weit verbreitet und fast in allen Gesteinen und Wässern, wenn auch in ungemein geringer Menge, zeigten, sondern noch mehr, daß manchmal helle Linien im Spektrum erschienen, die mit den Linien aller übrigen bekannten Stoffe durchaus nicht übereinstimmten. So fiel den beiden Forschern im Spektrum häufig eine prachtvolle rote, noch vor der Kaliumlinie liegende helle Linie auf, und zugleich mit ihr erschienen stets einige andere Linien von konstanter Lage; sodann beobachteten sie bisweilen eine ganz besonders helle und schön gefärbte blaue Linie, die ebenfalls stets von bestimmten anderen Linien begleitet war und mit der blauen Strontiumlinie nicht verwechselt werden konnte. Bisweilen traten die beiden neuen Linien gleichzeitig auf, bisweilen die rote allein mit ihrem Hofstaate, bisweilen nur die blaue Linie mit dem ihrigen; vorzugsweise waren es gewisse Mineralien, Lepidolith z. B. und die Dürkheimer Sole, welche die Erscheinung in ganz besonderer Schönheit bemerken ließen. So überraschend diese Beobachtung den Forschern war, so überraschend mußte der ganzen gebildeten Welt die Entdeckung sein, welche der Scharfsinn der beiden Männer als Ergebnis an dieselben knüpfte. „Die Linien müssen eine Ursache haben; nach allen Erfahrungen muß dieselbe eine den Ursachen anderer heller Linien ähnliche sein; die übrigen hellen Linien werden durch Stoffe hervorgebracht, deren Dampf in der Flamme glüht; in unserer Flamme muß also ein oder müssen mehrere Körper glühen, welche mit den uns bis jetzt bekannten ebenso wenig übereinstimmen, wie die beiden von ihnen hervorgerufenen hellen Linien mit den bisher bekannten; in dem Lepidolith und der Dürkheimer Sole müssen ein Paar neue Elemente stecken, von denen die Chemiker noch keine Ahnung haben."

So schlossen Bunsen und Kirchhoff. So schloß einst Leverrier in Paris, als er die Beobachtungen gewisser Störungen in der Bahn der Planeten seiner Rechnung unterwarf und den Neptun als Störenfried herausrechnete. Der Neptun wurde später, der Berechnung gemäß, von Galle gefunden, und die beiden neuen Elemente, auf deren Existenz aus der Beobachtung geschlossen wurde, wurden auch dargestellt, und zwar von ihren Entdeckern selbst, welche sie nach der Farbe ihrer charakteristischen Linien mit den Namen Rubidium und Cäsium bezeichneten. Beide Metalle haben größere Verwandtschaft zum Sauerstoff als das Kalium, mit dessen Verbindungen ihre Salze einige Übereinstimmung erkennen lassen, so daß sie sich in reinem, gediegenem Zustande in der Natur gar nicht erhalten können. Ihre Reindarstellung gelang erst mit Hilfe der galvanischen Batterie. Später als die beiden genannten Metalle wurde auf spektralanalytischem Wege von Reich in Freiberg das Indium, welches durch eine prachtvolle indigoblaue Linie charakterisiert ist, von Crookes das Thallium, welches sich durch eine sehr deutlich hervortretende grüne Linie auszeichnet, und von Lecoq de Boisbaudran das Gallium, welches eine feine violette Linie zeigt, entdeckt.

Aber nicht diese Auffindung neuer chemischer Elemente allein war es, die der Spektralanalyse plötzlich eine so hervorragende Bedeutung unter den physikalischen und chemischen Untersuchungsmethoden gab; vielmehr erschien dies geringfügig gegen die kosmischen Entdeckungen, welche die Lichtanalyse in denjenigen Räumen des Weltalls darbot, aus denen eben nichts zu uns herüber reicht, als die Wellenerschütterung des Äthers, und die uns so lange dunkel bleiben mußten, als wir jene Lichtschwingungen nicht zu deuten verstanden. Das Verständnis wurde erst durch die Spektralanalyse erschlossen.

Nachdem man die Spektra aller möglichen irdischen Stoffe untersucht und die Gesetze erkannt hatte, nach denen sie sich verändern, je nachdem in der Flamme ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung desselben zum Glühen gebracht wird, je nachdem der Körper fest, flüssig oder gasförmig ist; nachdem man ferner den Einfluß erkannt hatte, welchen erhöhter oder verminderter Druck ausübt, dem der leuchtende gasförmige Körper ausgesetzt ist, oder die Temperatur, in welcher er ins Glühen kommt; nachdem alle diese Umstände in der erschöpfendsten Weise untersucht und zu diesen Untersuchungen entsprechende Apparate und Methoden erfunden worden waren, ergaben sich aus der Zusammenstellung der erlangten Resultate und aus der Diskussion der gemachten Beobachtungen Schlüsse von zuvor ungeahnter Tragweite. Man erhielt durch die Spektralanalyse Aufschluß nicht nur über die chemische Natur der Körper unseres Sonnensystems, sondern ebenso über die Zusammensetzung der Fixsterne, von denen der nächste doch gegen 4 Billionen Meilen von uns entfernt ist; ja man durfte sogar die Lösung der Fragen erwarten: ob diese entfernten Himmelskörper im Weltraum feststehen, oder sich bewegen, und wenn sie sich bewegen, in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit. Der schon erwähnte englische Astronom Huggins hat z. B. nicht bloß das Licht von Fixsternen, sondern auch von Nebelflecken (Orionnebel) untersucht und konnte aus der nach einer bestimmten Seite gehenden Linienverschiebung im Spektrum schließen, daß z. B. Orion α, unter Berücksichtigung der Bewegung der Erde, sich mit einer Geschwindigkeit von 35 Kilometer in der Sekunde von der Erde, resp. von der Sonne fortbewegt.

Als Kirchhoff sein spektralanalytisches Grundgesetz aufgestellt und durch Experimente erwiesen hatte, daß ein dampfförmiger Körper dieselben Lichtstrahlen absorbiert, welche er selbst aussendet, wenn er sich in dampfförmigem glühenden Zustande befindet, war zuerst eine richtige Deutung der Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums gegeben. Verglichen mit den Spektren der irdischen Stoffe zeigte sich, daß eine sehr große Anzahl dieser dunklen Linien genau der Lage nach mit vielen der hellen Linien zusammenfielen, welche die Spektra der irdischen Stoffe zeigten. Das Spektrum des Eisens z. B. zeigt 460 helle Linien, welche, wie die Beobachtungen von Kirchhoff, Hoffmann, Ångström und Thalén zeigten, genau zusammenfallen mit ebenso vielen dunklen Linien des Sonnenspektrums; das Titanspektrum hat über hundert mit Fraunhoferschen Linien übereinstimmende helle Linien; die hellen Linien des Natrium, Kalium, Mangan, Chrom, Nickel, Kobalt, des Calcium, Baryum, Magnesium, des Kupfers, des Wasserstoffs u. s. w. kehren im Sonnenspektrum als dunkle Linien wieder.

Das Kirchhoffsche Gesetz war bewiesen, und es war nur eine logische Anwendung desselben, wenn man schloß, daß um die hellleuchtende Sonne eine Atmosphäre schwebe, die alle jene Stoffe in dampf- oder gasartiger Form enthalte, und die kraft ihrer Zusammensetzung das von dem glühenden Sonnenkern ausgehende kontinuierliche Licht zum Teil absorbiere. Wenn man die große Anzahl von Linien in Erwägung zieht, welche die Spektra der irdischen Substanzen mit den dunklen Linien des Sonnenspektrums übereinstimmend zeigen, so wird man an eine Zufälligkeit nicht mehr glauben und der Kirchhoffschen Theorie über die Zusammensetzung der Sonne, wenn sie auch in manchen Einzelheiten noch eine oder die andere Modifikation erfahren kann, doch darin, daß jene irdischen Substanzen in der Sonnenatmosphäre enthalten sind, den höchsten Anspruch auf Richtigkeit zuerkennen müssen. Wir müssen uns die Sonne als einen leuchtenden Kern vorstellen, der von einer glühenden Atmosphäre von niedrigerer Temperatur, der Photosphäre, umgeben ist. Das Licht des Sonnenkerns ohne die Photosphäre würde uns ein kontinuierliches Spektrum liefern; da es aber durch die Photosphäre geht, so werden diejenigen Strahlen des Sonnenkerns, welche die Photosphäre selbst aussenden kann, von ihr absorbiert, und es entstehen an ihrer Stelle dunkle Linien im Spektrum, die Fraunhoferschen Linien. Manche Substanzen, z. B. Silber, Quecksilber, Blei, Zinn, Kadmium, Strontium und Lithium zeigen eine solche Übereinstimmung ihrer Spektrallinien mit den Fraunhoferschen Linien nicht, ebensowenig das Silicium und der Sauerstoff; daraus aber schließen zu wollen, daß diese Stoffe auf der Sonne nicht vorkommen, dürfte dennoch gewagt sein, da ebenso gut noch nicht erforschte Umstände die Spektra gerade dieser Körper beeinflußt haben können.

Die Spektralanalyse hat uns aber noch weitere Blicke in die Lebensthätigkeit der Sonne eröffnet. Man erblickt die Sonne nicht scharf begrenzt, sondern infolge der Zerstreuung des Lichts von einem leuchtenden Schein umgeben, welcher wegen seines Glanzes im allgemeinen uns hindert, die interessanten Erscheinungen an den Sonnenrändern zu beobachten. Man hat in dem Spektroskop ein Instrument entdeckt, welches die rätselhaften Protuberanzen — eigentümliche (rosafarbene) leuchtende, wolkenartige Hervorragungen über den Sonnenrand von bedeutender Höhe (bis 40000 Meilen) und wechselnder Form — die man bisher nur bei totalen Sonnenfinsternissen beobachten konnte, jederzeit bei hellem Sonnenschein nachweisen und in ihrer Lage, Form und Größe zu bestimmen ermöglicht. Ein Phänomen, zu dessen Beobachtung man früher, und zwar noch in den Jahren 1868 und 1869, welche durch totale Sonnenfinsternisse ausgezeichnet waren, ganz besonders großartige und kostspielige Expeditionen ausrüstete, ist jetzt der tagtäglichen Beobachtung und Untersuchung zugänglich geworden. Die Intensität des weißen Sonnenlichts kann, wie wir gesehen, durch Anwendung einer größeren Anzahl von Prismen beliebig geschwächt und zerstreut werden, während einfarbiges Licht, welches mit dem Glanz des Sonnenlichts gemischt und durch ihn verdeckt ist, durch die Dispersion nichts an Intensität einbüßt. Hierauf gründeten Lockyer und Janssen ihre Untersuchungsmethode der einfarbigen Spektralstreifen der Protuberanzen. Alles deutet darauf hin, daß die Protuberanzen gewaltige Wasserstoffausströmungen sind, die aus dem Sonnenkern an einzelnen Stellen plötzlich und unter sehr großem Druck hervorbrechen; denn ihr Spektrum besteht aus mehreren hellen Linien, die mit den Linien des Wasserstoffs übereinstimmen. Indem man den feinen Spalt des Spektroskops tangential so gegen den Sonnenrand richtet, daß er diesen nur zum geringen Teile mit deckt, erhält man außer dem Sonnenspektrum auch das Spektrum der Protuberanz, wenn sich eine solche gerade an der Stelle des Sonnenrandes befindet, und man kann beide, auch wenn sie sich decken, von einander unterscheiden, da das Sonnenspektrum von dunklen Linien durchzogen ist, das der Protuberanz aber nur aus hellen Linien besteht, die sich selbst auf dem Sonnenspektrum noch bemerklich machen, wenn man das Sonnenlicht durch sehr weit getriebene Zerstreuung mittels einer großen Anzahl von Prismen beträchtlich schwächt. Die hellen Linien der Protuberanzen werden dadurch nicht mit zerstreut, sie behalten vielmehr ihre Intensität bis auf die Verminderung, die sie an ihrer Helligkeit durch die Absorption, welche das Glas bewirkt, erfahren.



402. Joseph Norman Lockyer.

Im Spektrum des Sonnenrandes sind die Linien von Eisen, Natrium, Baryum, Calcium, Chrom, Titan, Mangan, Magnesium sicher konstatiert. Das Aussehen der chromosphärischen Linien am Sonnenrande ist ein eigentümliches und ändert sich mit dem

Auftreten von Protuberanzen und mit deren Veränderungen. **Dies gilt besonders von der Linie D_3 von der Wellenlänge 587,5 Milliontel Millimeter, der sogenannten Heliumlinie, welche fast in den Spektren aller Fixsterne, die die Wasserstofflinien hell enthalten, auftritt, und welche keiner dunklen Linie im Sonnenspektrum entspricht.**

Man hat die Nebelflecke durch das Spektroskop als **wolkenartige Gebilde** kennen gelernt. Ihr Spektrum ist kein kontinuierliches; es **besteht vielmehr aus** vier Linien, von denen die hellste die Wellenlänge 500,4 **Milliontel eines Millimeter** hat; und daraus muß geschlossen werden, daß jene kosmischen **Gebilde als wesentliche** Bestandteile Gasmassen im Zustande sehr hoher Verdünnung **enthalten. Und** zwar läßt die Thatsache, daß in den Spektren einiger Nebelflecke, so z. B. des **Ringnebels** in der Leier, des Nebelflecks im Wassermann, jene hellste Linie mit einer **Stickstofflinie** und zwei andere Linien mit den beiden Wasserstofflinien H_β und H_γ **zusammenfallen**, den weiteren Schluß zu, daß die genannten beiden Gase einen **wesentlichen Anteil** an der stofflichen Zusammensetzung jener lichtstrahlenden Massen haben. **Die erste an Kometen** im Jahre 1864 von Donati angestellte Spektralbeobachtung führte zu dem durch spätere Beobachtungen bestätigten Resultate, daß ein Teil des **Kometenlichts selbständig** vom Kometen ausgesendet wird, indem sein Spektrum drei helle **Bänder auf einem kontinuierlichen** Untergrunde aufweist. In den wenigen Jahren, in denen das **Spektroskop** erst der physischen Astronomie seine Dienste hat leisten können, sind es **nur kleinere Kometen** gewesen, die sich der Analyse ihres Lichtes dargeboten haben. **Aus den angestellten Beobachtungen** kann man deshalb zwar noch keine endgültigen **Schlüsse ziehen**, es ist aber doch zu konstatieren, daß das Spektrum der bisher untersuchten **Kometen eine merkwürdige** Ähnlichkeit mit dem Spektrum eines glühenden **Kohlenwasserstoffes zeigt**, daß also ein Teil des Kometenlichts mit hoher Wahrscheinlichkeit als **von einem leuchtenden** Kohlenwasserstoffe herrührend zu betrachten ist, während aus anderen **spektralanalytischen** Untersuchungen an Kometen gefolgert werden muß, daß ein **Teil des Selbstleuchtens** gewissen elektrischen Vorgängen im Kometen zuzuschreiben ist.

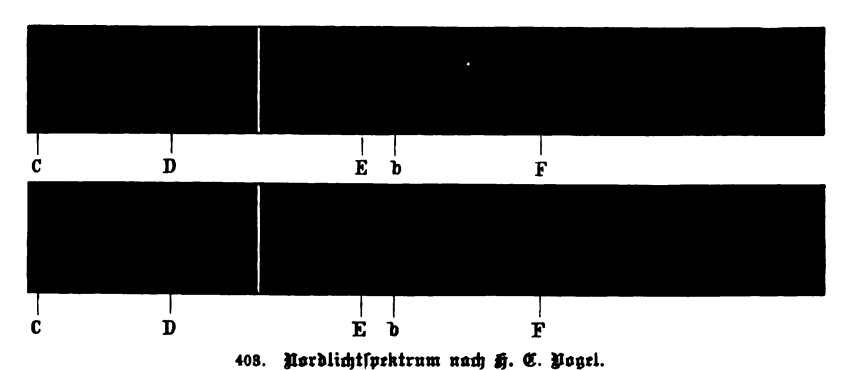
In dieser Hinsicht soll hier nicht unerwähnt bleiben, daß es einer **kurzen** Veröffentlichung der Berliner Sternwarte zufolge in neuester Zeit **gelungen zu sein scheint**, charakteristische Züge der Kometenerscheinungen, nämlich die **Lichtausstrahlungen** am Kometenkopf und die daraus hervorgehende Schweifentwickelung **experimentell mit Hilfe** von Kathodenstrahlen (vergleiche den späteren Abschnitt über den **Durchgang** der Elektrizität durch verdünnte Gase) nachzubilden. In dem ganzen **Bereiche des Raumes**, welcher die Kathode, d. i. den negativen Pol der stark evakuierten **Entladungsröhre**, als lichtschwächste Schicht des **Kathodenlichts**, umgibt, zeigen sich nämlich **bestimmte Abstoßungswirkungen** der Kathode auf solche elektrische Strahlen, die an der **Oberfläche** der in jenen Raum gebrachten festen Körper durch die auf sie fallenden **primären Kathodenstrahlen** hervorgerufen werden. Falls eine Analogie zu Kometenerscheinungen **hier vorliegt**, wäre die Sonne als Sitz weit in den Weltraum reichender **Abstoßungswirkungen** im Gebiete der Lichterscheinungen anzusehen, und zwar als **Ausgangsstelle** sehr **langer Bündel** von Kathodenstrahlen, während der Komet, ein von sehr dünnen **Dämpfen umgebenes** Aggregat fester Körperchen, sein Analogon in jenen, im **Abstoßungsraume der Entladungsröhre** befindlichen festen Körpern fände, von welchen erst eine **kurze Strecke zur abstoßenden** Kathode hin, dann von ihr fort nach entgegengesetzter **Richtung leuchtende hohle, den Kometenschweifen** ähnliche, Lichtparaboloide sich weithin in den fast **luftleeren Raum erstrecken.**

Die eigentliche Sonnenatmosphäre, die Corona, das **Licht der Fixsterne, das Zodiakallicht**, das Nordlicht, kurz alle Phänomene, welche leuchtend am **Himmel auftreten, sind mit** Hilfe der Spektralapparate untersucht worden, und so jung diese **Forschungsmethode noch** ist, so zahlreich sind schon die Aufschlüsse, die uns durch sie über **das Wesen der Himmelskörper** geworden sind. Das Nordlichtspektrum, welches **nach den Beobachtungen von** H. C. Vogel in Potsdam in Abb. 403 dargestellt ist, ist ein **diskontinuierliches Emissionsspektrum** von variablem Aussehen; es ist durch eine sehr helle Linie **im Grün, die sogenannte** „Nordlichtlinie“ charakterisiert. Das Spektrum des **Zodiakallichtes dagegen ist** ein kontinuierliches Spektrum, in welchem man meistens **auch die Nordlichtlinie erblickt.**

Was das Blitzspektrum anbelangt, so beobachtet man bei Funkenblitzen das Linienspektrum, bei Flächenblitzen das Bandenspektrum der Luft, entsprechend der Funken- und der Büschelentladung einer Elektrisiermaschine; es setzt sich zusammen aus dem Sauerstoffspektrum des negativen Poles und dem Linienspektrum des Stickstoffes. Das Spektrum des Argons, eines in der neuesten Zeit von Lord Rayleigh und von William Ramsay als eines wesentlichen Bestandteiles unserer Erdatmosphäre entdeckten gasförmigen Körpers, tritt nach den Spektraluntersuchungen von Eder und Valenta in Plückerschen Röhren je nach dem Grade der Verdünnung des Gases und der Art der elektrischen Entladung in verschiedenen Formen auf, welches die genannten Forscher als „rotes“, „blaues“ und „glänzend weißes“ Argonspektrum unterscheiden.

* * *

Das Spektroskop gewährt aber nicht nur die Möglichkeit, Vorgänge, die sich in ungeheuren Entfernungen von uns abspielen, in ihren Ursachen aufzuklären, sondern es bleibt uns auch die Antwort nicht schuldig, wenn wir es auf das Nächstliegende richten, ja wenn wir sozusagen mittels desselben in uns selbst hineinsehen lassen. Es vereinigt die Eigenschaften des Mikroskopes mit denen des Teleskopes. Lockyer teilt in seinen Vorlesungen einen Fall mit, der dies recht anschaulich macht. Ein englischer Arzt spritzte die sehr verdünnte



408. Nordlichtspektrum nach H. C. Vogel.

Lösung eines Lithiumsalzes einem Meerschweinchen unter die Haut, um die Geschwindigkeit nachzuweisen, mit welcher der tierische Körper im stande ist, gewisse Stoffe aufzunehmen und in seinem Organismus zu verbreiten. Diese Frage ist für die praktische Heilkunde gewiß von großer Bedeutung. Bei jenem Versuche nun ließ die eigentümliche Lithiumlinie im Spektrum erkennen, daß der eingespritzte Stoff schon nach 4 Minuten bis an die Galle gedrungen war; nach 10 Minuten war der ganze Körper davon infiziert, selbst die Krystalllinse des Auges zeigte Spuren. Ebenso hat man Starblinden vor der Operation geringe Mengen kohlensauren Lithions eingegeben und nachgewiesen, daß dieses Salz nach einigen Stunden in allen Organen des Körpers, auch in der Krystalllinse des Auges wiederzufinden war.

Auch die Technik hat in neuerer Zeit die Spektralanalyse auf den verschiedensten Gebieten mit Vorteil benutzt, und die Spektralapparate finden wegen ihrer erfolgreichen, der Praxis und Wissenschaft geleisteten Dienste eine weitverbreitete Anwendung. In den Bessemer Stahlwerken hat die Art und Weise der Produktion des Stahles eine Erleichterung und Kostenverminderung erfahren, seitdem mit Hilfe der spektralanalytischen Untersuchung der ganze Prozeß genau geregelt werden kann. Da nämlich der herzustellende Gußstahl nur einen ganz bestimmten Prozentsatz von Kohlenstoff haben darf und es somit von ausschlaggebender Wichtigkeit ist, den Prozeß genau in dem Moment zu unterbrechen, in welchem jener Prozentsatz erreicht ist, so kann, wenn man versehentlich den Prozeß nur wenige Sekunden zu lange andauern läßt, leicht der ganze Inhalt der Retorte — gewöhnlich hundert und mehr Zentner — unbrauchbar werden. Das Spektroskop läßt nun jenen Moment auf das sicherste erkennen. Die bei der großen Hitze glühend aus der

Retorte tretenden Dämpfe zeigen nämlich ein sich allmählich veränderndes Spektrum, welches anfänglich die hellen Linien des Kohlenstoffes aufweist, die aber immer schwächer werden, je weiter die Entkohlung des Eisens fortschreitet, und in dem Augenblicke, wo der Gußstahl gar ist, verschwinden. In diesem Momente muß das Einströmen von Luft unterbrochen werden. Hier ist das Spektroskop also ein Wegweiser für das Gelingen eines Prozesses, bei dem es sich immer um beträchtliche Summen handelt, und zwar der sicherste, denn es gibt kein Hilfsmittel der Technik, welches nur annähernd gleich zuverlässig wäre.

Aber auch die Nahrungsmittelverfälschungen, dieses große Übel unserer Zeit, erfahren durch das Spektroskop eine zuverlässige Beobachtung und scharfe Kontrolle.

Auch in der Farbenindustrie erweist sich das Spektroskop als ein ebenso nützliches wie notwendiges Instrument, da die meisten Farbstoffe, auch in sehr verdünnten Lösungen, Absorptionsspektra zeigen, welche für jeden Farbstoff charakteristisch sind. So zeichnet sich das Chlorophyll, der grüne Farbstoff der Pflanzen, welcher sich durch Alkohol oder Äther aus frischen und getrockneten Pflanzen ausziehen läßt, durch ein Absorptionsspektrum aus, welches durch bestimmte Absorptionsstreifen im Rot und im Grün charakterisiert ist; so läßt sich das Absorptionsspektrum des Purpurin zweckmäßig als Reagenz für Magnesia und Thonerde anwenden, so besitzt das Alizarin ein durch bestimmte Absorptionsstreifen im Grün charakterisiertes Absorptionsspektrum, so lassen sich viele rote Farbstoffe, welche häufig zu Fälschungen bei der Fabrikation des Rotweins benutzt werden, durch ihre Absorptionsspektra nachweisen.

Von ganz besonderer Bedeutung für die gerichtliche Medizin ist das Absorptionsspektrum des Blutes, dessen Farbstoff, das Oxyhämoglobin, außer der Absorption im Blau zwei starke Absorptionsbänder zwischen den Fraunhoferschen Linien D und E aufweist. Durch Behandlung mit gewissen chemischen Reagenzien lassen sich Blutflecken in Stoffen leicht und sicher durch das Absorptionsspektrum konstatieren, ebenso wie sich Vergiftungen durch Kohlenoxyd durch eine Verschiebung der beiden Absorptionsstreifen im Absorptionsspektrum des Blutes unzweideutig erkennen lassen. Empfehlenswert für diese und ähnliche Untersuchungen, welche für die Technik und das praktische Leben von größter Wichtigkeit sind, ist das auf S. 329 beschriebene Universalspektroskop von Prof. Vogel, welches gleichzeitig zwei Spektren über einander liefert, das Absorptionsspektrum und das von einer Lichtquelle herrührende, zur Vergleichung dienende Emissionsspektrum.

Janssen, der die Wasserstoffnatur der Protuberanzen entdeckte, Huggins, Miller, Secchi, Herschel, Lockyer, Thalén, H. C. Vogel, Rowland, Kayser und Runge sind Namen, welche ruhmvoll mit der Ausbildung und den Erfolgen der Kirchhoff-Bunsenschen Spektralanalyse verknüpft sind, und wenn wir jene erwähnen, so dürfen wir derer nicht vergessen, welche durch die Vervollkommnung der mechanisch-optischen Hilfsmittel und Instrumente den Beobachtungen eine immer wachsende Schärfe und Genauigkeit gegeben, neue Apparate erdacht und dadurch neue Versuchsweisen ermöglicht haben: Steinheil, Merz, Browning, Meyerstein, Rutherford, Hugo Schroeder, Krüß, Schmidt und Haensch.

Die Spektralanalyse legt in allen Punkten glänzendes Zeugnis ab für das menschliche Genie in glücklicher Erfassung des überaus einfachen Grundgedankens, in scharfsinniger Erfindung der elegantesten Methoden und deren Anwendung auf das unermeßliche Gebiet der Erscheinungen, in Stellung der Fragen und in Mitteln zu ihrer Beantwortung, sowie endlich in dem Reichtum der erlangten Resultate.

Ob nun die durch die neue Untersuchungsmethode hervorgerufenen Theorieen die einschlagenden natürlichen Erscheinungen endgültig erklärt haben oder nicht, ist allerdings bis zu völliger Sicherheit noch nicht erwiesen und auch nicht erweisbar. Denn wie alles außer uns Liegende nur auf dem Wege der Schlußfolgerung unser Eigentum werden kann, so werden alle gewonnenen Anschauungen immer noch hypothetische bleiben. Aber die Hypothese nähert sich um so mehr der Gewißheit, je mehr sie Thatsachen umfassen kann, und je weniger unter allen ihr widersprechen. Die durch die Spektralanalyse gewonnenen Anschauungen gehören aber gerade zu denjenigen, welche durch ihren mathematischen Charakter große Befriedigung gewähren.

Die Camera obscura.

Die Welt im dunklen Zimmer. Von den Linsen. Ihr Prinzip und ihre Wirkungsweise. Die Linsen- und Prismenapparate der Leuchttürme. Scheinwerfer. Sphärische Abweichung. Sammellinsen. Brennweite. Linsenbilder, reelle und virtuelle. Achromatische Linsen und ihre Erfindung. Schleifen der Linsen. Die Camera obscura. Sonnenbildchen bei der Sonnenfinsternis. Laterna magica und Nebelbilder.

Kaum irgend ein anderer physikalischer Apparat dürfte eine ähnliche überraschende Wirkung auf jeden Beschauer ausüben, als die Camera obscura.

Auf einer ebenen Fläche weißen Papiers sehen wir die uns umgebende Landschaft mit allem natürlichen Zauber der Perspektive, Färbung und Beleuchtung. Zwischen grünen Auen schlängelt sich ein Fluß hin. Auf seiner klaren Oberfläche spiegelt sich die Sonne; überhängendes Gebüsch oder steilere Ufer werfen dunkle Schatten, und die hell beleuchteten Gebäude an dem Gestade, die darüber gespannten Bogen der Brücke zeigen ihr wiederkehrendes Bild in dem flüssigen Elemente. Darüber hinaus erheben sich waldbewachsene Hügelketten, die sich in duftiger Ferne verlieren. Im Vordergrunde aber blicken wir in die Straßen und Plätze einer großen Stadt, und über dem Ganzen schwebt der luftdurchflossene Himmel mit seinem körperlosen Blau, das den Blick in unendliche Tiefen zieht. Wenn der Zeichenstift des Malers auch die Umrisse des Bildes wiederzugeben vermag, so muß der größte Künstler daran verzweifeln, den Reiz der Farbe und des Lichtes, welcher das wunderbare Gemälde erfüllt, erreichen zu wollen. Vor allem überraschend aber ist die in dem Bilde herrschende Bewegung, durch welche wir in ein ganz neues Gebiet von Erscheinungen versetzt werden. Wir sehen nicht die Natur in einem einzelnen Momente fixiert. Die weißen Wolken bleiben nicht stehen, wie sie selbst auf dem vollendetsten Kunstwerke des Malers fest stehen bleiben. Wir verfolgen sie mit unseren Augen, wenn sie an dem blauen Himmelsgewölbe vorüberziehen und mit ihrem Schatten die darunter liegende Gegend strichweise verdunkeln. Das Glitzern der Wellen zeigt uns die Bewegung des Wassers, die Wipfel der Bäume schwanken, in matt erkennbaren Wellen wogt das Ährenfeld, und wir glauben den Wind zu fühlen, der die Blätter zittern macht und das Wasser kräuselt.

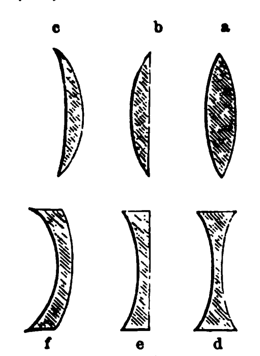
Da kommt ein Boot um die Biegung des Flusses, vorn sitzen die Ruderer und führen mit regelmäßigem Taktschlage das leichte Fahrzeug uns näher. Sie legen an. Einige von der Gesellschaft steigen ans Ufer und wandeln zwischen Hecken jenem Gartenhause zu, dessen Thür sich öffnet und wieder schließt. Und näher im Mittelpunkte der zauberischen Tischplatte entwickelt sich jetzt ein wechselreiches, buntes Leben. Die kühler werdenden Stunden des Nachmittags locken eine festlich geschmückte Menge hinaus ins Freie. Bunt gekleidete Frauen, Männer, springende Kinder, Hunde, Wagen, Pferde — alles, was Beine hat, krabbelt mit seinem Schatten über den Plan und verschwindet um Straßenecken, taucht wieder auf, begegnet sich und grüßt sich. Man sieht einander sprechen — du hältst den Atem an, weil du glaubst, jeden Augenblick müsse der Schall an dein Ohr schlagen. So kann man stundenlang diesen immer wechselnden und unerschöpflichen Reizen der Betrachtung sich hingeben; und der Apparat, durch den sie hervorgebracht werden, ist so einfach, ein Zauberstab könnte nicht einfacher sein. Eine ebene Tischplatte, ein Spiegel, ein paar Linsen. — Was sind Linsen?

Um zu erfahren, auf welche Weise das reizende Bild in der Camera obscura erzeugt wird, müssen wir uns zuvor mit den hauptsächlichsten Bestandteilen derselben und ihrer Wirkungsweise bekannt machen.

Die Linsen, d. h. die optischen Linsen, mit denen wir es hier allein zu thun haben, sind regelmäßig geschliffene Glaskörper von meist runder Gestalt, deren Oberfläche mindestens auf der einen Seite gekrümmt ist. Die verschiedenen Arten derselben sind in Abb. 404 so dargestellt, wie sie im Querschnitt aussehen würden. Je nachdem die Krümmung nach außen oder nach innen zu geht, unterscheidet man zunächst konvexe und konkave Linsen. Konvex oder erhaben heißen solche Linsen, welche in der Mitte dicker sind als am Rande. Sie heißen auch Sammellinsen (Lupen), und man unterscheidet

bikonvexe (a) und plankonvexe (b) Linsen. Die konkaven oder Hohllinsen sind am Rande dicker als in der Mitte. Sie heißen auch Zerstreuungs- oder Verkleinerungslinsen, und man unterscheidet bikonkave (d) und plankonkave (e) Linsen. Durch Zusammenstellung der beiden Krümmungsarten erhält man ferner die in der Mitte dickeren konkavkonvexen (c) und die in der Mitte dünneren konvexkonkaven (f) Linsen.

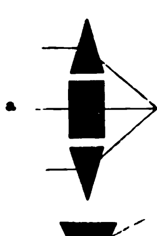
Diejenige gerade Linie, welche die Krümmungsmittelpunkte der kugeligen Begrenzungsflächen verbindet, heißt die Hauptachse der Linse. Bei den plankonvexen und plankonkaven Linsen ist die Hauptachse das von dem Krümmungsmittelpunkte auf die ebene Fläche gefällte Lot. Den Winkel, den die von zwei einander gegenüberliegenden Randstellen der Linse nach diesen beiden Krümmungsmittelpunkten gezogenen Radien mit einander bilden, nennt man die Öffnung oder Apertur der Linse.

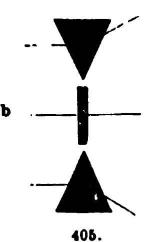


404. Sammellinsen und Zerstreuungslinsen.

Die optische Wirkung der Linsen können wir uns am besten veranschaulichen, wenn wir von dem Prisma ausgehen und zu diesem Behufe die Zeichnung Abb. 405 zu Grunde legen. Denken wir uns zwei Prismen und eine kleine ebene Glasplatte so gegeneinander gestellt, wie es Abb. 405 a zeigt, so werden diejenigen parallel ankommenden Sonnenstrahlen, welche durch die Mittelplatte hindurchgehen, ungebrochen ihren Weg fortsetzen, diejenigen aber, welche die Prismen treffen, eine Ablenkung nach der Achse hin erfahren (Konvexlinsen). Denken wir uns weiter zwei Prismen und eine plane Platte so zusammengestellt, wie es Abb. 405 b zeigt, so werden parallel auffallende Strahlen wieder durch die Mittelplatte ungebrochen hindurchgehen, durch die Prismen aber eine Ablenkung von der Achse fort erfahren (Konkavlinsen).

Thatsächlich ist aber der Vorgang nicht so einfach, sondern komplizierter, weil man sich wegen der Krümmung der Linse den verschiedenen Punkten ihrer Oberfläche entsprechend verschiedene Prismen mit kontinuierlich sich änderndem, brechenden Winkel denken müßte. Als brechender Winkel ist nämlich der Winkel anzusehen, welchen die Richtungen der beiden im Eintritts- und Austrittspunkte eines Strahles tangential an die Linse gelegten Geraden mit einander bilden.





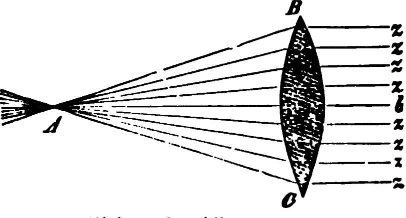
405. Prinzip der Linsen.

Sind die Prismen in Bezug auf ihre Form und ihre Brechung genau einander gleich, so werden die parallel auffallenden Strahlen auch durch sie eine gleiche Ablenkung erfahren und sich in denselben Punkten der Achse schneiden. An dieser Stelle der Achse wird ein Spektrum von einer gewissen Ausdehnung entstehen, selbst wenn wir uns durch jedes der Prismen nur je ein schmales Strahlenbündel gehend denken. Dieses Spektrum wird also von den drei durch die Planplatte und durch die beiden Pismen hindurchgehenden Strahlen gebildet.

Denken wir uns nun aber anstatt der drei schmalen Strahlenbündel ein breites Strahlenbündel von derselben Richtung her auf das System von Glaskörpern Abb. 405 a fallen, so werden die einzelnen Strahlen desselben zwar auch in gleicher Weise wie vorher gebrochen, aber wir werden ein Spektrum von ziemlich großer Ausdehnung erhalten, das nur an den Rändern gefärbt ist, in der Mitte aber, wo die verschiedenen Strahlen der einzelnen kleinen Spektra sich über einander legen und vermischen, werden wir gewöhnliches weißes Licht erblicken.

Es leuchtet ein, daß die Strahlen, welche nahe der Achse einfallen, diese früher schneiden werden als diejenigen, welche erst an der Spitze in das Prisma eintreten. Je höher und spitzer das Prisma ist, um so größer wird die Ausdehnung des Spektrums sein. Durch Abstumpfung der oberen Hälfte des Prismas könnte man das Spektrum verkürzen und intensiver machen, wenn man es so einrichtete, daß die äußersten Strahlen der Spitze nahe auf denselben Punkt mit den äußersten Strahlen der unteren Prismenhälfte gebrochen würden. Durch fortschreitende Zerlegungen einer jeden Prismenhälfte in weitere

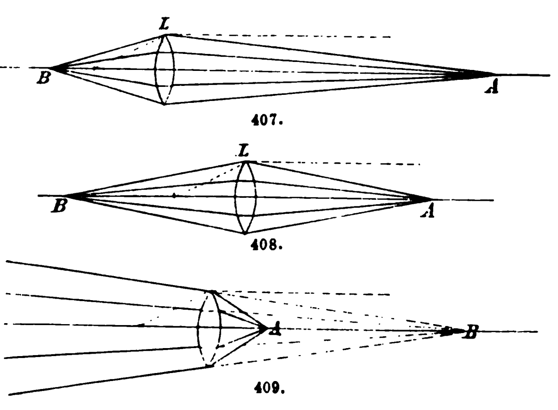
zwei Prismen würden die einzelnen Spektren immer mehr einander genähert und schließlich die ganze durch die Prismen gebrochene Lichtmasse in einem einzigen Punkte der Achse vereinigt werden können. Freilich müßte dann streng genommen jedem der verschiedenen Strahlen ein besonderes Prisma entsprechen, und die brechenden Winkel dieser Prismenschar müßten kontinuierlich in einander übergehen. Im Querschnitt erschiene das ganze Prismensystem nicht mehr wie in Abb. 405 a von geraden Linien begrenzt, sondern es würde eine stetig verlaufende Krümmung zeigen, wie in Abb. 406, welche das Prinzip der bikonvexen Linse darstellt. Alle Strahlen z, welche parallel auf die Linse auffallen, werden hinter derselben in einem Punkte A vereinigt. Eine solche Linse, in welcher also die einzelnen Prismen ihre Grundflächen einander zukehren, heißt deshalb auch eine Sammellinse.



406. Wirkung der bikonvexen Linse für parallel der Achse auffallende Strahlen.

Eine andere, aber auf ganz analoge Art zu erklärende Wirkung üben diejenigen Linsen aus, bei welchen die Prismen ihre Spitzen einander zukehren, und welche durch Abb. 404 d, e, f, sowie Abb. 405 b dargestellt sind. Hier werden die Strahlen von der Achse abgelenkt und zerstreuen sich hinter derselben, deshalb heißen Linsen dieser Art Zerstreuungslinsen.

Die Wirkung einer Linse hängt außer von der brechenden Kraft ihres Materials, von ihrem Durchmesser und ihrer Krümmung ab. In der Praxis haben wir es meistenteils mit Linsen zu thun, die sphärisch gekrümmt und geschliffen sind. — Um uns nun mit der Theorie der Linsen im allgemeinen bekannt zu machen, genügt es, die bikonvexen und die bikonkaven Linsen auf ihr Verhalten zu untersuchen. Sie können als Vertreter der übrigen Arten dienen.



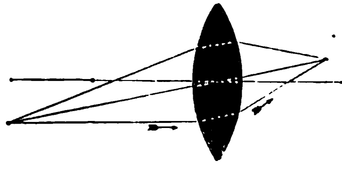
407—409. Wirkungsweise der Konvexlinse.

Der Punkt A (Abb. 406), in welchem parallel zur Hauptachse ankommende Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Konvexlinse vereinigt werden, heißt der Hauptbrennpunkt der Linse; er liegt auf der Hauptachse, und seine Entfernung vom Mittelpunkt der Linse nennt man ihre Brennweite. Fallen von einem auf der Hauptachse liegenden leuchtenden Punkt A (Abb. 407) Strahlen auf die Linse L, so werden dieselben nach ihrem Durchgange jenseits auf der Achse in einem Punkt B vereinigt, welcher der reelle Bildpunkt des leuchtenden Punktes heißt. Je mehr die Lichtquelle aus der Unendlichkeit sich der Linse nähert, je mehr also die Strahlen divergierend auf die Linse fallen, um so weiter rückt jenseit der Linse der Vereinigungspunkt der gebrochenen Strahlen von der Linse fort. Wenn der leuchtende Punkt in den Hauptbrennpunkt gelangt ist, so gehen die gebrochenen Strahlen jenseit in paralleler Richtung von der Linse aus weiter. Abb. 406 kann zugleich zur Erläuterung dieses Falles dienen: ebenso wie die parallel ankommenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse sich in dem Brennpunkt A vereinigen, können wir uns A als leuchtenden Punkt vorstellen, von welchem Strahlen auf die Linse fallen; sie werden, nachdem sie durch die Linse gebrochen worden sind, jenseits in den parallelen Richtungen b und z weitergehen. Leuchtender Punkt und Bildpunkt können in ihrer Wirkungsweise mit einander vertauscht werden. Es sind konjugierte Punkte. Rückt die Lichtquelle der Linse noch näher über den Hauptbrennpunkt hinaus, so werden die Strahlen von der Linse derart gebrochen, daß sie jenseit der Linse divergieren.

Wie bei der Betrachtung der Wirkungsweise des Hohlspiegels können auch für die Wirkungsweise einer Konvexlinse drei Fälle unterschieden werden:

1) Liegt der leuchtende Punkt A diesseits außerhalb der doppelten Brennweite, so liegt der reelle Bildpunkt B jenseits um weniger als die doppelte, aber mehr als die einfache Brennweite von der Linse entfernt (Abb. 407).

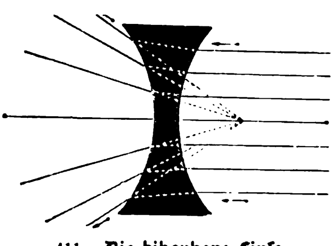
2) Liegt der leuchtende Punkt A diesseits um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so liegt auch der reelle Bildpunkt B jenseits um die doppelte Brennweite entfernt (Abb. 408).



410. Wirkung der Linse auf seitwärts auffallende Strahlen.

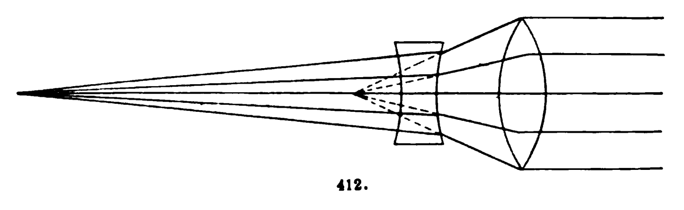
3) Liegt der leuchtende Punkt A diesseits zwischen der Linse und ihrem Brennpunkt (Abb. 409), so ist sie nicht mehr im stande, die divergierend auf sie fallenden Strahlen parallel oder gar konvergent zu machen, sondern sie vermindert nur ihre Divergenz. Die Verlängerungen der divergierenden Strahlen nach rückwärts schneiden sich dann in einem Punkte B, welcher der virtuelle Bildpunkt von A heißt und auch zu A konjugiert ist, so daß in diesem Falle die konjugierten Punkte auf derselben Seite der Linse liegen.

Ebenso werden auch Strahlen, welche von einem Punkte ausgehen, der nicht auf der Hauptachse liegt, durch Sammellinsen einander zugebrochen, wie es Abb. 410 darstellt. Die durch den Mittelpunkt der Linse gehenden Strahlen heißen Nebenachsen. Auch auf Nebenachsen werden solche Punkte, deren einer das Bild des anderen ist, konjugierte Punkte genannt.



411. Die bikonkave Linse.

Bei Hohllinsen oder Zerstreuungslinsen gibt es nicht solche Punkte, in denen sich parallel oder divergent einfallende Lichtstrahlen vereinigen. Wenn man aber die divergierenden Strahlen rückwärts über die Linse hinaus verlängert, so treffen sie in einem Punkte zusammen, welchen man den virtuellen Brennpunkt oder den Zerstreuungspunkt nennt (Abb. 411). Er liegt stets auf derselben Seite der Linse, wie der leuchtende Punkt. Die Strahlen eines durch eine Konvexlinse erzeugten konvergierenden Strahlenkegels, dessen Spitze zwischen die Hohllinse und ihren virtuellen Brennpunkt fallen würde, vereinigen sich nach dem Durchgange durch die Hohllinse in einem je nach der Konvergenz der auffallenden Strahlen mehr oder weniger entfernten Punkte (Abb. 412).



412.

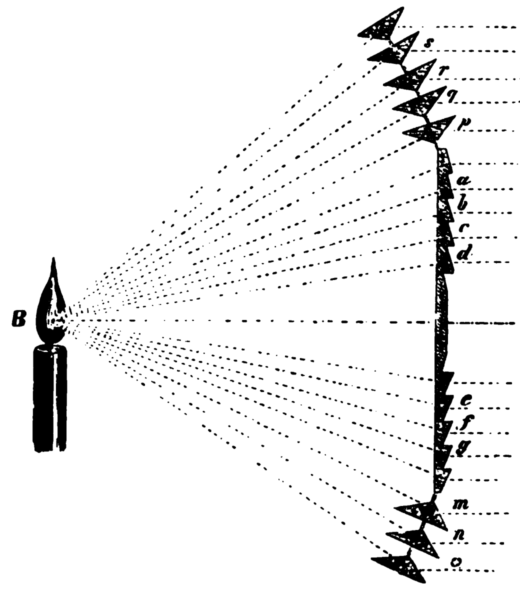
Eine praktisch sehr wichtige Anwendung von der lichtzerstreuenden Kraft der Linsen hat man in den Laternen der Leuchttürme gemacht; Abb. 414 gibt uns die äußere Ansicht eines solchen Apparates, während Abb. 413 uns schematisch den Weg zeigt, welchen die Lichtstrahlen durch die Linsen einzuschlagen gezwungen werden.

Bekanntlich kommt es bei den Leuchttürmen in erster Reihe darauf an, nicht nur ein möglichst intensives Licht hervorzubringen, sondern ein Licht, das sich sofort als das Licht eines Leuchtturmes erkennen läßt und nicht mit irgend einem anderen verwechselt werden soll. Um dieser Anforderung zu entsprechen, hat man verschiedene Methoden und Apparate in Anwendung gebracht, man ist aber allgemein der Ansicht, daß eine in regelmäßigen Zwischenräumen periodisch sich wiederholende Unterbrechung des Lichtes, deren Folge und Dauer in ihrer Bedeutung den Seefahrern bekannt ist, das zweckmäßigste und am leichtesten zu erkennende Mittel dazu ist. Diese Unterbrechung ruft man dadurch hervor, daß man die ganze Lichtmenge, welche die Lampe liefert, in einzelne Partieen teilt, jede derselben für sich zu einem Lichtbündel paralleler Strahlen vereinigt und

dieses den zu beleuchtenden Rayon in fast horizontaler Richtung bestreichen läßt, indem man den ganzen Apparat sich mit einer gewissen Geschwindigkeit um seine Achse drehen läßt.

In der Regel wird die Laterne durch einen großen, auf mehreren Armen ruhenden Glaskörper gebildet, in dessen Mittelpunkt die Lichtquelle (am besten elektrisches Bogenlicht) sich befindet. Diese Laterne fußt mit einem Zapfen in einem Cylinder, in welchem sie durch ein daneben befindliches Uhrwerk in Umdrehung gesetzt wird, so daß die einzelnen Systeme von Linsenstücken, aus denen sie besteht, nach einander ihre Lichtmengen im Kreise herumführen. In einer gewissen Entfernung empfängt jeder Punkt während der Dauer einer Umdrehung mehrere, z. B. acht Mal das Licht von dem Leuchtturme und wird abwechselnd ebenso oft in Dunkelheit gesetzt. Denn infolge der besonderen Einrichtung dieser Systeme wird die auf jedes derselben von der Lampe fallende Lichtmenge gezwungen, parallel zur Hauptachse der Linsen auszutreten und zwar unter einem nur geringen Verluste ihrer ursprünglichen Intensität, weil keine Zerstreuung der Strahlen stattfindet. Freilich vermögen die Strahlen aber auch in der weitesten Entfernung nur einen Streifen zu erhellen, der, wenn ihr Parallelismus vollkommen gewahrt bliebe, nicht breiter wäre, als ein einzelnes Linsensystem der Laterne.

In dem mittleren Teile eines solchen Sektors wird die Brechung der Strahlen nicht durch eine einzige Linse, sondern durch Fresnels konzentrisches System von Linsenringen bewirkt; in diesem Falle brauchen die einzelnen Linsen nicht so stark gewählt zu werden. Würde man die Linse aus einem Stücke herstellen, so müßte sie in der Mitte sehr dick sein, was einen bedeutenden Verlust an Lichtintensität infolge von Absorption bedingen würde.

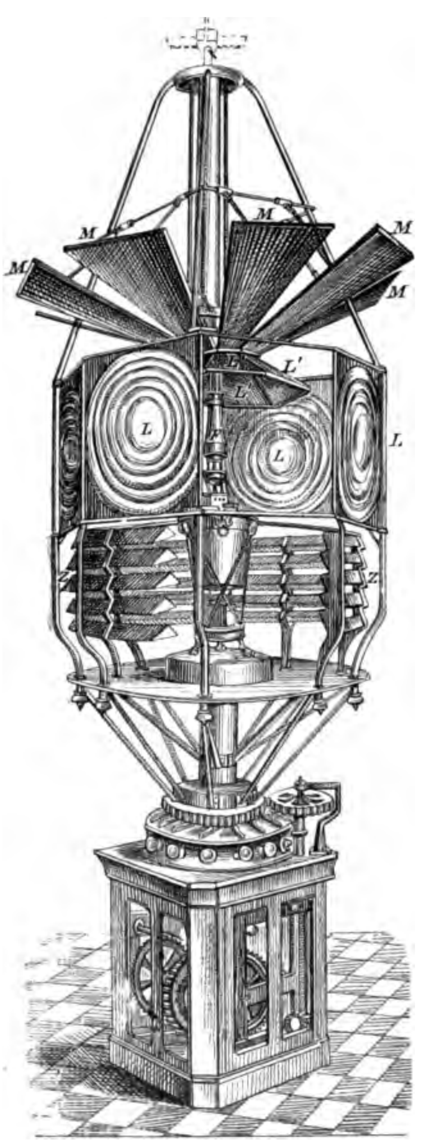


413. Gang der Lichtstrahlen bei dem Linsenapparat der Leuchttürme.

In dem oberen und unteren Teile des Systems (Abb. 413) wird für die Strahlen m, n, o und p, q, r, s die parallele Bahn entweder durch die Reflexion von Spiegeln oder durch die totale Reflexion innerhalb der im Durchschnitt gezeichneten Prismen bedingt; in letzterem Falle wird die Brechung nur insofern zur Erhöhung der Wirksamkeit benutzt, als durch sie die in einer Ebene liegenden Strahlen parallel zu den übrigen gemacht werden. Die Flächen der Prismen sind deshalb nicht eben, sondern müssen eine gewisse Krümmung erhalten, welche durch die Entfernung der Lichtquelle, des Brennpunktes, bedingt ist, und die also für jede Zone eine andere sein wird.

Nach dem Fresnelschen System ist z. B. einer der schönsten Leuchttürme gebaut, der 63 m hohe Leuchtturm von New Skerryvore an der Westküste Schottlands, welcher durch Abb. 414 dargestellt ist: acht Linsenringsysteme L sind in einem Rahmen von 2 m Durchmesser so angeordnet, daß die Lampe F im Brennpunkte sämtlicher Linsen steht, folglich ihre Strahlen nach dem Durchgange durch die Linsen parallel in horizontaler Richtung fortgehen. Die ebenen Spiegel M (anstatt deren auch ein System total reflektierender Prismen angewandt werden kann, wie z. B. in der schematischen Abb. 413 dargestellt ist) über den Linsenringen erhalten durch die Linsen L' konzentriertes Licht, welches gleichfalls in horizontaler Richtung den Apparat verläßt. Ebenso macht der Kranz von total reflektierenden Prismen Z im unteren Teile des Leuchtturmes die von der Lampe auf ihn treffenden Strahlen gleichfalls parallel zu den anderen Lichtstrahlen. Im Fuße des

Leuchtturmes befindet sich das Uhrwerk, welches den ganzen Apparat in acht Minuten einmal um seine Achse rotieren läßt. Das obere Spiegelsystem gibt während einer Minute einen schwachen und einen starken Blitz, welche 30 Seemeilen weit sichtbar sind; das von dem mittleren Linsen- und dem unteren Prismensystem ausgehende Licht nimmt in jeder Minute vom Minimum bis zum Maximum der Lichtintensität zu, um dann wieder bis zum Minimum abzunehmen.

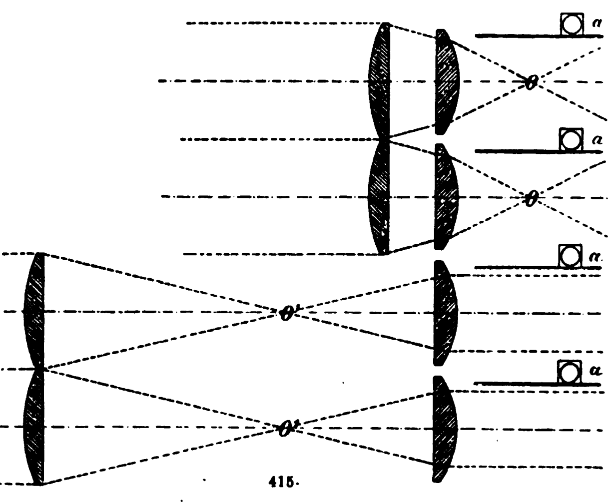


414. Leuchtturm mit Drehfeuer.

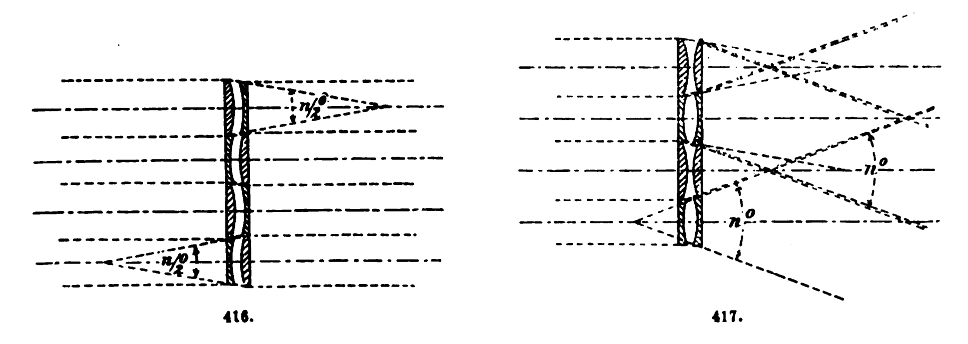
Scheinwerfer. Fresnels Linsenringsystem ist aber nicht das einzige, welches für Scheinwerfer verwendet worden ist. Gerade in neuester Zeit sind solche konstruiert, deren Wirkungsgrad und Nutzeffekt den der Fresnelschen Anordnung bei weitem übertreffen. Allerdings wird ja bei Linsenringen die sphärische Aberration infolge geringer Glasstärke vermindert. Es ist aber dabei durchaus notwendig, daß die Lichtquelle ihre Lage im Brennpunkte des Systems unverrückbar beibehält. Kommt sie jedoch durch irgend eine Veranlassung einmal aus dem Brennpunkte heraus, so entsteht eine Verzerrung und infolgedessen eine bedeutende Verringerung der Intensität des Lichtbündels. Die ersten Verbesserungen an Scheinwerfern erreichte der französische Genieoberst Mangin durch Anwendung von sphärischen Hohlspiegeln, welche aus schwachen Konvexkonkavlinsen mit Silberbelag bestehen. Er erreichte damit, daß, wenn der Durchmesser des Spiegels kleiner ist als seine Brennweite, die sphärische Aberration praktisch als aufgehoben betrachtet werden kann, da die von der Lichtquelle ausgehenden Strahlen an der Konkavseite des Spiegels eine Brechung erleiden und nach ihrer Reflexion an der Konvexseite parallel der Achse des Spiegels austreten. Die Abänderungen, welche diese Scheinwerfer im Laufe der Jahre von Sautter-Lemonier, Tschikolew, Siemens und Halske und anderen erfuhren, erwiesen sich zwar als Verbesserungen in mancher Beziehung, erfüllten jedoch nicht alle an einen guten Scheinwerfer gestellten Bedingungen. Erst mit den im Jahre 1886 von Schuckert nach einem patentierten Verfahren aus einem Stück hergestellten Glasparabolspiegeln traten überlegene Nebenbuhler der Manginspiegel auf. Die Hauptvorteile der neuen Spiegel bestehen darin, daß sie frei sind von chromatischer und sphärischer Aberration, daß sie wenig Licht absorbieren und die Möglichkeit der Wahl einer passenden Brennweite gewähren. Als Lichtquelle dient bei dem Schuckertschen Scheinwerfer Bogenlicht; die Kohlen liegen horizontal; die dadurch hervorgerufene, vorteilhafte Kraterbildung in der positiven Kohle läßt bei mittlerer Brennweite des Spiegels eine bessere Ausnutzung der Lichtquelle erzielen.

Die Einrichtung der Schuckertschen Scheinwerfer ist im allgemeinen folgende: Der in Asbest gebettete Spiegel sitzt in einer gußeisernen Fassung und befindet sich ebenso wie die Lampe in einem leichten, eisernen Gehäuse, welches mit seitlichen Tragzapfen in

Ständern neigbar aufgehängt ist. Die Ständer sind mit einem Drehtisch verbunden, welcher auf Rollen laufend sich um einen mittleren Zapfen eines feststehenden Untersatzes frei drehen läßt. Die Bewegung des Gehäuses in horizontalem und vertikalem Sinne kann schnell und langsam mit der Hand oder mit Hilfe von Elektromotoren erfolgen, welche an dem Drehtische angebracht sind. Die Verbindung mit dem dazu gehörigen Umschalter bildet ein mehrlitziges Kabel. Die Horizontallampe ist je nach der Größe des Scheinwerfers für verschiedene Stromstärken und Spannungen konstruiert. Ihre Regulierung kann automatisch oder mit der Hand erfolgen. Das Licht des Reflektors muß für größere Entfernung mehr konzentriert, für die Nähe mehr gestreut werden. Die größte Konzentration ergibt die Brennpunktstellung der Lichtquelle, zu geringem Streuen genügt ein Verschieben der Lampe aus dem Brennpunkt; für größere Streuung bedarf man einer besonderen Vorrichtung, des **Streuers**, der aus einer Anzahl von in einem Rahmen zu einer Scheibe vereinigten Glascylinderlinsen besteht. Da der Austausch von Streuer gegen Planglas eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt, so sind



415.

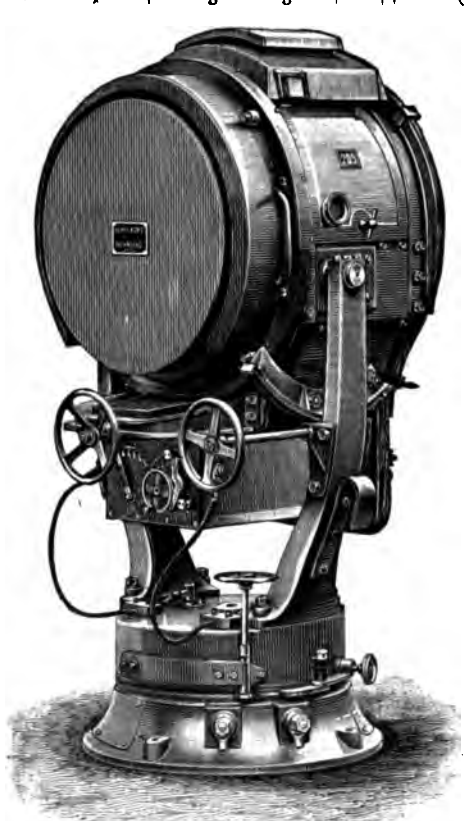


416. 417.

von Schuckert sogenannte „**Doppelstreuer**" eingeführt, welche aus einer in dem vorderen Teil des Scheinwerfers dauernd angebrachten Kombination von plankonvexen und plankonkaven Cylinderlinsen bestehen, derart, daß immer ein festes und ein bewegliches System solcher Gläser vor einander stehen. Durch Verschieben des beweglichen Systems kann je nach Belieben konzentriertes oder gestreutes Licht erzielt werden (Abb. 415). Um den Streuungswinkel von 0° bis etwa 48° ändern zu können, dienen die sogenannten „Doppelstreuer für verstellbaren Streuungswinkel", eine Kombination von festen und beweglichen, in der Achsenrichtung verschiebbaren Cylinderlinsen (Abb. 416). In dem oberen Teile derselben werden die von dem Spiegel her parallel ankommenden Strahlen durch die beiden Plankonvexlinsen, die wie eine bikonvexe wirken, so gebrochen, daß sie nach ihrem Durchgange durch beide Linsen erst im Punkte 0 vereinigt werden und dann divergieren, und zwar um so stärker, je näher die Linsen zusammenrücken. In dem unteren Teile der Abbildung, in welchem das bewegliche Linsensystem weiter von dem festen entfernt ist, werden die parallel vom Spiegel kommenden Strahlen in dem Brennpunkt 0' des beweglichen Linsensystems vereinigt und durch das feste System parallel gemacht.

Eine andere Art von Doppelstreuern besteht darin, daß zwei gleiche Systeme von Streuungsgläsern so vor einander gesetzt werden, daß entweder ein Konvexglas einem Konkavglas oder ein Konvexglas einem Konvexglas und ein Konkavglas einem Konkavglas gegenüberstehen. Durch die erste Anordnung erhält man konzentriertes Licht (Abb. 415); die zweite Anordnung (Abb. 417) gibt gestreutes Licht, da die Konkavgläser des einen Streuers eine durch die Konkavgläser des anderen hervorgerufene Divergenz der Lichtstrahlen vergrößern und ebenso beide vor einander liegende Konvexgläser wie ein einziges stärkeres Konvexglas wirken.

Zum Signalgeben sind die Scheinwerfer der eben beschriebenen Anordnung mit einem jalousieartigen Signalisierapparat (a) versehen, dessen einzelne Stäbe so vor dem vorderen Streuer angeordnet sind, daß sie sich in Räumen befinden, auf welche kein Licht fällt; sie verursachen daher keinen Lichtverlust und können deshalb immer zum Gebrauch bereit am Platze bleiben.



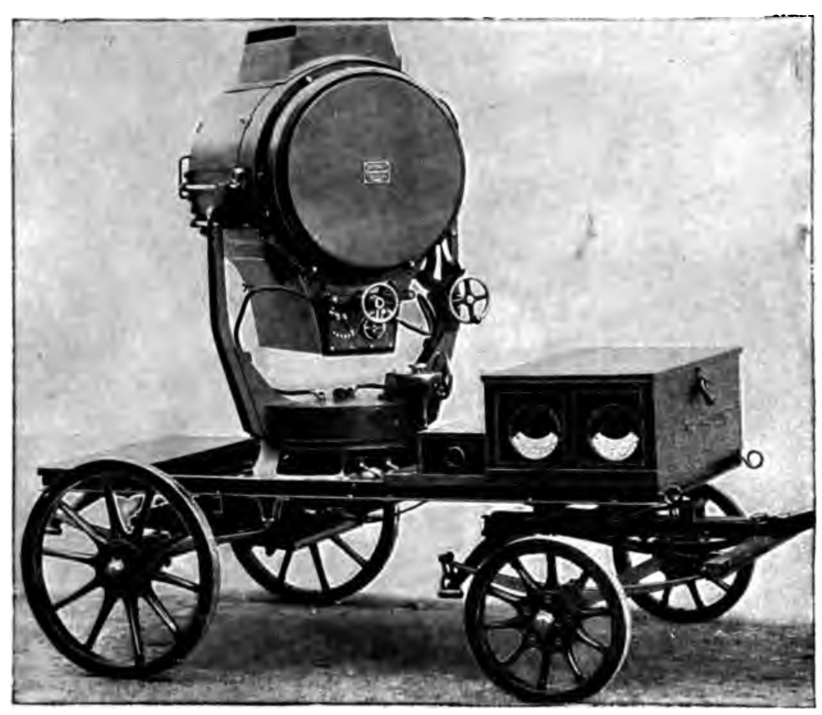
418. Kleiner Scheinwerfer.

Die Scheinwerfer der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. sind den verschiedenen Zwecken entsprechend verschieden gebaut. Der kleine Scheinwerfer (Abb. 418) kommt bei der Landarmee wegen seines geringen Gewichtes in gebirgigen Gegenden und für rasch wechselnde Aufstellungen, hauptsächlich aber bei der Kriegsmarine infolge des geringen Raumbedürfnisses und seiner leichten Handlichkeit auf Torpedobooten, sowie kleineren Schiffen zur Verwendung. Sein Glasparabolspiegel hat einen Durchmesser von 40 cm. Der in Bd. III abgebildete größere Scheinwerfer von 90 cm Spiegeldurchmesser ist für Marinezwecke bestimmt und mit elektromotorischer Drehbewegung versehen. Abb. 420 zeigt den größten Scheinwerfer der Firma mit 150 cm Spiegeldurchmesser, der im Jahre 1893 auf der Weltausstellung in Chicago ein wahrhaft glänzendes Zeugnis von der deutschen Technik gegeben hat. Endlich stellt Abb. 419 einen Scheinwerfertransportwagen dar. Es ist ein vierräderiger zweispänniger Wagen, mit einer auf Tragfedern montierten, eisernen Plattform versehen. Vor dem durch Schraubenbolzen an der Plattform gehaltenen Wagen ist ein Holzkasten befestigt mit Leitungskabeln und sonstigem Zubehör für den Scheinwerfer.

Linsenbilder. Mit Hilfe der auf S. 341—342 angeführten Erscheinungen, die eine vollständige Analogie mit den Erscheinungen an gekrümmten Spiegeln bilden, können wir uns die Wirkungsweise nicht nur der Camera obscura, sondern der meisten optischen Apparate, vom einfachen Vergrößerungsglase an bis zu den kunstreichsten astronomischen Beobachtungsinstrumenten, deutlich machen. Nehmen wir an, durch die in Abb. 421 dargestellte Linse L gingen von der Kerze K Lichtstrahlen, so werden dieselben in gewisser Entfernung hinter der Linse vereinigt, und zwar alle von dem Punkte a ausgehenden Strahlen in einem bestimmten Punkte a', der immer in der durch den Mittelpunkt gezogenen Nebenachse liegt; a' ist der Bildpunkt von a, b' derjenige von b. Ebenso haben die zwischen a und b befindlichen leuchtenden Punkte ihre entsprechenden Bildpunkte zwischen a' und b'. Es entsteht auf diese Weise ein reelles Bild, welches man mit einem Schirme

auffangen kann. Es ist verkehrt und je nach der Entfernung des leuchtenden Körpers von der Linse vergrößert oder verkleinert. Befindet sich die Kerze in einer Entfernung von der Linse, welche gleich ihrer doppelten Brennweite ist, so ist das erzeugte Bild gleichgroß mit der Kerze und liegt ebenfalls in doppelter Brennweite jenseit der Linse. Befindet sich die Kerze zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite von der Linse entfernt, so erhält man ein verkehrtes, vergrößertes Bild, welches jenseits um mehr als die doppelte Brennweite von der Linse entfernt ist. Befindet sich die Kerze weiter von der Linse entfernt, als deren doppelte Brennweite ist, so erhält man ein verkehrtes, verkleinertes Bild, welches jenseits zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite liegt.

Außer diesen reellen Bildern können aber die konvexen Linsen auch — ebenso wie Hohlspiegel — **virtuelle Bilder** liefern. Sie entstehen, wenn der leuchtende



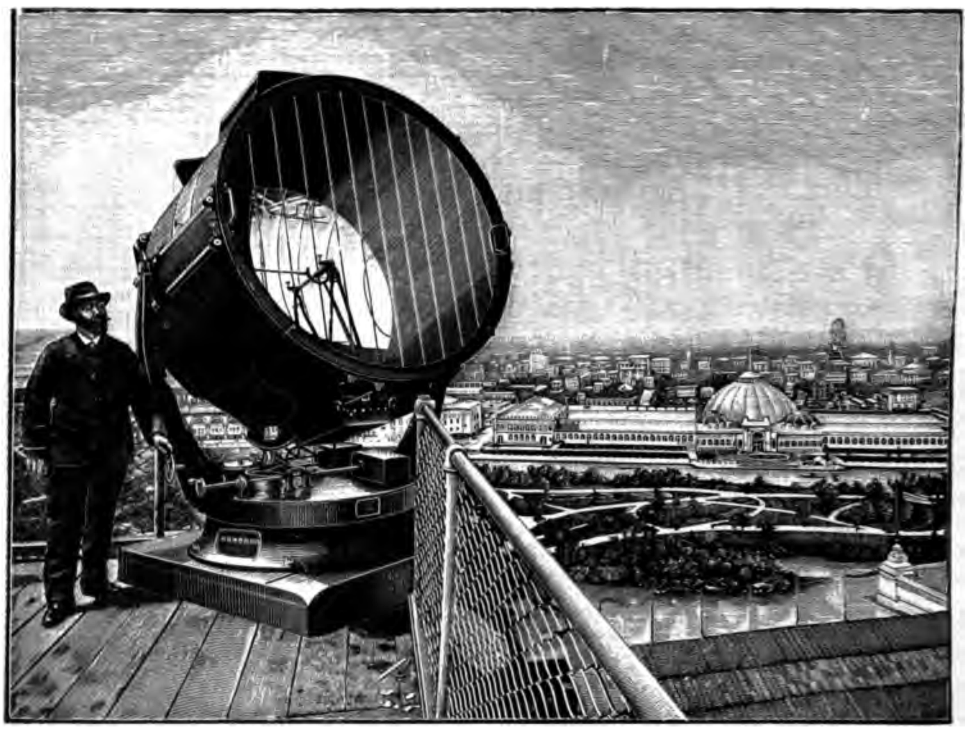
419. Scheinwerfertransportwagen.

Gegenstand sich in einer Entfernung von der Linse befindet, die kleiner ist als ihre Brennweite; in diesem Falle divergieren die Strahlen jenseits der Linse, und erst ein dort befindliches Auge erblickt den leuchtenden Gegenstand, den es in richtige Sehweite verlegt, unter einem größeren Sehwinkel; man erhält also ein aufrecht stehendes, vergrößertes, virtuelles Bild (Abb. 423). Man definiert die **Vergrößerung** einer Linse durch das Verhältnis der Größe des virtuellen Bildes zur Größe des Objektes. Durch Zerstreuungslinsen können reelle Bilder nicht erzeugt werden, die virtuellen müssen verkleinert erscheinen.

Sphärische Aberration. Von Linsen mit Kugeloberflächen gilt nicht in aller Strenge, daß sie die Lichtstrahlen in einem Punkte vereinigen, sondern je größer der Winkel wird, den die Strahlen mit der Achse bilden, um so näher an der Linse liegt ihr Vereinigungspunkt. Dem einzelnen Punkte, von dem Strahlen ausgehen, wird auf der anderen Seite nicht ein einziger Vereinigungspunkt entsprechen, sondern eine, wenn auch kleine Zone, und da dies für alle Punkte gilt, so wird, wenn man Linsen von

starker Krümmung oder kurzer Brennweite anwendet, das Bild nach dem Rande zu an Schärfe verlieren, je größer und näher der Gegenstand ist. Diese störende Erscheinung ist unter dem Namen der sphärischen Aberration oder Abweichung durch die Kugelgestalt bekannt; sie ließe sich durch Linsen mit nicht kugelförmiger Krümmung, z. B. parabolischer, umgehen; da aber deren Herstellung sehr schwierig ist, so bedient man sich lieber der Linsen von großer Brennweite, benutzt aber nur diejenige Mittelregion, auf welche die Strahlen noch unter genügend kleinem Winkel gegen die Achse auffallen.

Achromatische Linsen. Das von leuchtenden Gegenständen ausgehende Licht wird durch das Prisma ebenso in farbige Strahlen zerlegt wie das direkte Sonnenlicht, und eine gewöhnliche Linse wird notwendigerweise auch wie ein Prisma wirken. In der That, wenn man eine Linse in eine kleine Öffnung des Fensterladens setzt und durch sie Sonnenlicht

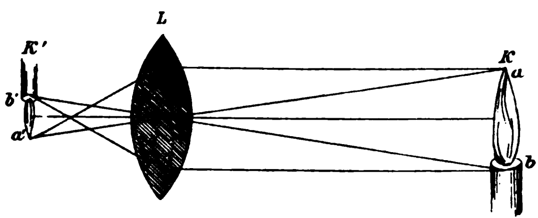


420. Scheinwerfer von Schuckert & Co. auf der Weltausstellung zu Chicago 1893.

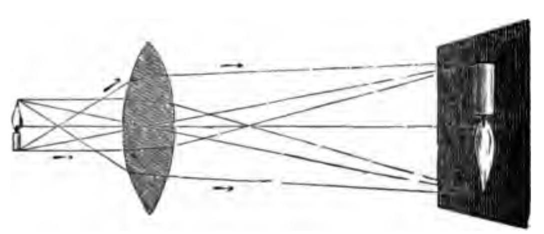
in das verdunkelte Zimmer eintreten läßt, so bildet sich auf der gegenüberstehenden Wand, selbst in der richtigen Brennweite, nicht ein völlig weißes Sonnenbild, sondern wir sehen dasselbe von einem schwachen Farbenrande umgeben; und wenn wir den Schirm weiter abrücken, so daß sich der Kreis vergrößert, so zerfließt das Bild immer mehr in konzentrische, regenbogenartig gefärbte Ringe. Dies kommt daher, weil der Brennpunkt der violetten Strahlen der Linse näher liegt als derjenige der roten (chromatische Abweichung). Bei den gewöhnlichen Apparaten kommt es nun nicht viel darauf an, ob wir die Gegenstände mit etwas farbigen Rändern sehen oder nicht. Bei den feineren optischen Instrumenten aber, dem Fernrohr, dem Mikroskop, den photographischen Apparaten u. s. w., ist es von größtem Einfluß auf die Deutlichkeit des Bildes, daß diese Abweichung soviel wie möglich verringert wird, und alle Strahlen nach einem einzigen Punkt konvergieren.

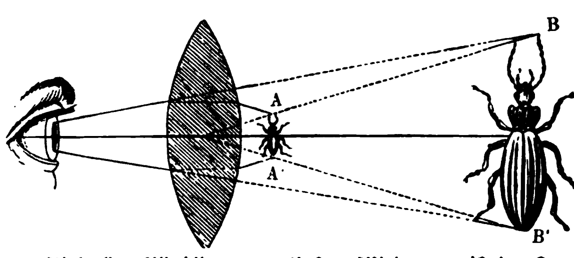
Wenn man von der lichtbrechenden Eigenschaft durchsichtiger Körper Anwendung machen will, so scheint es auf den ersten Anblick unmöglich, Ablenkung ohne Zerstreuung

zu erzeugen, und Newton selbst leugnete die Möglichkeit, „achromatische Linsen“ herzustellen, d. h. solche, welche das vergrößerte, resp. verkleinerte Bild nicht mit farbigen Rändern umgeben zeigen. Der große Mathematiker Euler rief daher durch seine Behauptung, daß dies dennoch erreicht werden könne, einen lebhaften Streit hervor, welcher erst durch Klingenstierna beendet wurde, der das Falsche der Voraussetzungen in Newtons Beweisführung nachwies. Newton war nämlich von der Annahme ausgegangen, daß die Größe der Farbenzerstreuung, welche die Breite des Spektrums bedingt, in direktem Verhältnis stehe zu der Größe der Ablenkung. Dies ist aber nicht der Fall, denn es gibt gewisse durchsichtige Körper, die bei geringerer Ablenkung ein ebenso breites Spektrum erzeugen als andere bei größerer Ablenkung. Auf diese Erfahrung hin wurden nun Versuche gemacht, Linsen ohne Farbenzerstreuung herzustellen, eine Aufgabe, die für die Vervollkommnung der Fernrohre von der größten Bedeutung war.



421. Reelles verkleinertes Bild der bikonvexen Linse.


422. Reelles vergrößertes Bild der bikonvexen Linse.



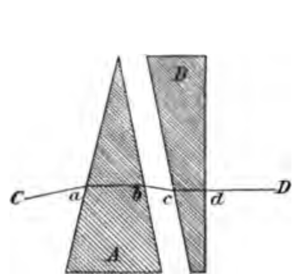
423. Virtuelles Bild bikonvexer Linsen. Wirkungsweise der Lupe.

Es heißt, daß ein Edelmann aus der Grafschaft Essex, Chester More Hall, der sich zu seinem Vergnügen mit physikalischen Studien beschäftigte, in London zuerst das Problem gelöst und bereits 1729 achromatische Linsen und 1733 achromatische Fernrohre konstruiert, aber niemand eine Mitteilung über sein Verfahren gemacht habe. Er ließ sogar, um sich nicht zu verraten, die einzelnen Bestandteile seiner Linsen (dieselben waren aus zweierlei Glassorten zusammengesetzt) bei verschiedenen Glasschleifern nach Maßangaben zurichten; aber gerade dieser Umstand führte die Entdeckung herbei. Denn Dollond, der berühmte Optiker, dessen Fernrohre damals weitaus für die besten galten, gab denselben Arbeitern Aufträge, und es fiel ihm beim Besuch verschiedener Werkstätten auf, dort geschliffene Gläser zu finden, welche gewisse gleiche Maßverhältnisse zeigten und, wie die Nachforschungen ergaben, für einen und denselben Besteller angefertigt wurden. Dahinter ein Geheimnis vermutend, verglich und untersuchte Dollond 1759 die Gläser auf das genaueste und gelangte so zu dem Verfahren, welches den optischen Wissenschaften die größten Dienste leisten sollte, indem es erst ermöglichte, Fernrohre und Mikroskope mit bedeutender Vergrößerung herzustellen, unbeschadet der Deutlichkeit und Schärfe der durch sie erzeugten Bilder.

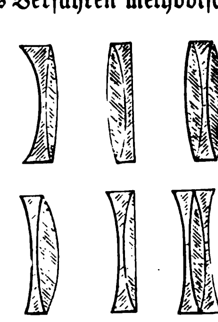
Mag nun an der Erzählung etwas Wahres sein, mag ein anderer eher als Dollond diese Erfindung gemacht haben, jedenfalls erscheint Dollond, der der Welt die Erfindung nutzbringend gemacht hat, doch einer bei weitem höheren Anerkennung wert, als jener Sonderling, der das Geheimnis für sich behielt.

Nehmen wir zwei Prismen A und B (Abb. 424), das erstere von Crownglas mit einem brechenden Winkel von 25° und dem Brechungsexponenten 1,53 für die D-Linie, das zweite von Flintglas mit einem brechenden Winkel von etwa 12° und dem entsprechenden

Brechungsexponenten 1,635, und untersuchen wir deren Spektra, so finden wir, daß dieselben zwar nicht um gleiche Winkel abgelenkt werden; denn während das Crownglasprisma A eine Ablenkung von ungefähr 13° 40′ hervorbringt, lenkt das Flintglasprisma B das Spektrum nur um 7° 34′ ab; trotz dieser Verschiedenheit in der brechenden Kraft ist aber die Zerstreuung der Farben in beiden Spektren gleich groß. Das eine Spektrum ist so breit wie das andere. Und wenn wir nun die beiden Prismen in der Art, wie es Abb. 424 zeigt, mit einander so kombinieren, daß die brechenden Kanten einander entgegengesetzt sind, so werden die Strahlen des vom Prisma A gebildeten Spektrums von dem Prisma B in entgegengesetzter Richtung wieder abgelenkt und, weil das Prisma B ein gleich breites Spektrum bilden würde, die violetten mit den roten und allen dazwischen liegenden Strahlen wieder an einer und derselben Stelle zu Weiß vereinigt. Die Farbenzerstreuung ist aufgehoben, aber — und das ist der große Gewinn — nicht die Ablenkung. Den durch das Prisma A bedingten Ablenkungswinkel von 13° 40′ hat das Prisma B nur um 7° 34′ verkleinern können; der Rest von 6° 6′ wird vom Optiker bei der Herstellung von achromatischen Linsen vorteilhaft verwertet. Man sieht leicht ein, daß man bei Linsen denselben Effekt wie bei Prismen erzielen kann, wenn man eine Konvexlinse von Crownglas und eine Konkavlinse von Flintglas miteinander vereinigt, und in der That soll Hall dies Verfahren schon eingeschlagen haben. Dollond und namentlich Fraunhofer haben jedoch erst das Verfahren methodisch ausgebildet und auf einen so hohen Grad der technischen Vollkommenheit gebracht, daß die Fraunhofersche Methode für die Herstellung achromatischer Linsen noch heute maßgebend ist. Bei Anwendung von Crown- und Flintglas ist eine vollständige Achromasie nicht zu erreichen, weil die Spektren der beiden Glassorten bei gleicher Länge nicht vollständig kongruent sind. Bei den in neuester Zeit von Abbe konstruierten apochromatischen Systemen, bei denen das Crownglas durch Fluorit (Flußspat) ersetzt ist, wird die chromatische, ebenso wie die sphärische Abweichung auf ein Minimum gebracht. Die Verhältnisse der Krümmungshalbmesser sind nach der brechenden Kraft der Glassorten zu berechnen. An den aneinander zu fügenden Flächen haben die beiden Bestandteile der Linse genau dieselbe Krümmung, so daß sie selbst, wenn kein Vereinigungsmittel dazwischen gebracht wird, sich an allen Punkten berühren. Um sie aber an einander zu befestigen, bringt man eine dünne Schicht Kanadabalsam dazwischen, der vollständig durchsichtig ist und den Gang der Lichtstrahlen nicht stört. Wenn in Zukunft bei der Besprechung neuerer optischer Instrumente Linsen schlechtweg erwähnt werden, so sind gewöhnlich achromatische Linsen gemeint, deren Kombinationen und Formen den Zwecken entsprechend verschieden gewählt werden (Abb. 425).




424. Achromatische Prismen.


425. Achromatische Linsen.

Schleifen der Linsen. Es möge an dieser Stelle noch mit wenigen Worten die praktische Herstellung linsenförmiger Gläser besprochen werden. Über die chemische Zusammensetzung der hauptsächlichsten, für die Linsenkonstruktion gebräuchlichen Glassorten erfahren wir das Nähere an anderer Stelle dieses Werkes, wo von dem Glase im allgemeinen die Rede sein wird; hier mag nur die Methode, den Gläsern die richtige Krümmung zu geben, Erwähnung finden, weil dies für die optischen Zwecke die Hauptsache ist. Die Kunst, Linsen aus Glas zu schleifen, scheint zuerst in Holland in ausgedehntem Maße ausgeübt worden zu sein. In welche Zeitepoche die Anfänge dieser Kunstbethätigung fallen, darüber herrscht keine Klarheit. Die Angabe, daß in den Ruinen von Ninive ein antikes optisches Glas, eine plankonvexe Linse von 11,24 cm Brennweite, gefunden worden sei, ist nur mit Vorsicht aufzunehmen — denn es liegt durchaus nichts

Analoges vor, welches voraussetzen läßt, daß die alten Assyrer jene Kunst geübt hätten — gewiß ist aber, daß die alten Römer Linsen aus Bergkrystall und Glas kannten.

Stärkere Linsen werden erst im Rohen gegossen und dann aus den groben Glasstücken herausgeschliffen; schwächere, wie sie zu Brillengläsern Verwendung finden, schneidet man aus flachen Glastafeln aus; die weitere Vollendung erhalten sie dann durch Schleifen auf den sogenannten Schleifschalen; das sind für Konvexgläser vertiefte Schalen von Messing, für Konkavgläser dagegen nach außen gewölbe Kuppen. Jede Krümmung verlangt eine besondere Schale, und diese werden so hergestellt, daß man zunächst aus Messingblech zwei Schablonen nach der Krümmung, welche die verlangte Linse haben soll, anfertigt, von denen die eine die Krümmung nach außen, die andere nach innen erhält. Nach diesen Modellen werden dann auf der Drehbank zwei Schalen gedreht und, nachdem sie gut ausgearbeitet sind, mit feinem Schmirgel auf einander abgeschliffen und dadurch sowohl justiert als geglättet. Die Schale, welche man nun zum Schleifen benutzen will, befestigt man in horizontaler Lage auf einer gewöhnlich zum Treten eingerichteten Schleifmühle, welche bei der Arbeit in möglichst raschen Umlauf versetzt wird. Das Glasstück wird auf einer Art Handhabe festgepicht, die Schale mit Schmirgel und Wasser bestrichen, die Handhabe mit geringem Druck aufgesetzt und, während die Schale umläuft, die Stellung der Linse auf derselben fortwährend geändert, wodurch sie genau die Krümmung der Schale annimmt. Je weiter die Arbeit fortschreitet, desto feinerer Schmirgel muß gewählt werden. Hat die Linse auf der einen Seite die richtige Form, so wird sie gewendet und nun auf der anderen Seite bearbeitet. Schließlich erhält sie auf derselben Schale die Politur; anstatt aber mit Schmirgel, wird zu diesem Zwecke die Schale mit einer Lage von Pech oder Kolophonium ausgekleidet, der man durch Aufdrücken der Gegenschale die richtige Form gibt. Auf das Pech kommt Polierrot, und die Arbeit geht dann in derselben Art vor sich, wie das Schleifen. Obwohl das Schleifmittel vorzugsweise das Glas angreift, so erleidet doch auch das Messing eine nicht zu vernachlässigende Abnutzung, in deren Folge die späteren Linsen von den früheren immer größere Abweichungen zeigen müßten. Um dies zu verhüten, wird von Zeit zu Zeit die Schale mit der Gegenschale eingeschmirgelt.

Lange Zeit haben die Linsen nur eine untergeordnete Verwendung gefunden, sie dienten zu Brenngläsern, Vergrößerungsgläsern, Brillengläsern und einfachen Lupen, und diesen Zwecken genügte eine ziemlich rohe Bearbeitungsweise. Auch die ihrer bedeutenden Größe wegen merkwürdigen Linsen, welche bisweilen ausgeführt worden sind, und durch welche namentlich der bekannte sächsische Edelmann Tschirnhausen sich einst großen Ruf erwarb, konnten wesentliche Fortschritte nicht hervorrufen. Tschirnhausen legte zwar auf einem seiner Güter in der Oberlausitz eine Wassermühle zum Schleifen seiner Gläser an und fertigte mit Hilfe derselben Brenngläser bis zu 1 m im Durchmesser und von einer Brennweite bis zu 4 m, aber die Linsen waren eben gut, Fische und Krebse mitten im Wasser durch Sonnenstrahlen zu sieden; einen größeren Nutzen hatten sie nicht. Die damalige Zeit sah natürlich in dem Kuriosum etwas ganz ungemein Wertvolles.

Heutzutage muß der praktische Optiker seine Aufgaben in ganz anderen Punkten sehen, und die Maschinen und Vorrichtungen, welche er zur Erreichung seiner Zwecke konstruiert hat, verraten den größten Scharfsinn und die peinlichste Genauigkeit. Die vollständige Beschreibung eines Etablissements, wie des optischen Instituts in München, das, von Utzschneider und Reichenbach errichtet, unter Fraunhofer und später unter Steinheil und Merz weltberühmte Instrumente geliefert hat, oder der jüngeren Zeißschen optischen Werkstatt und des glastechnischen Laboratoriums der Gebrüder Schott in Jena, würde selbst ein Buch für sich bilden. Wir müssen uns hier damit begnügen, solche Institute zu erwähnen, und wenden uns nun der Betrachtung jenes Apparates zu, der in theoretischer sowohl als in praktischer Beziehung einer der wichtigsten optischen Apparate genannt zu werden verdient.

Die Camera obscura. Wer von unseren Lesern hätte, wenn er unter einem schattigen Baume saß, durch dessen Blätterlücken die Strahlen der Sonne auf die weiße

Fläche eines Tischtuches oder auf den hellen Kiesboden fielen, noch nicht verwundert die Bemerkung gemacht, daß alle die einzelnen Lichtflecke eine kreisrunde Gestalt besitzen, daß sie nicht die Form der unregelmäßigen Öffnungen abbilden, sondern sämtlich unter sich gleich gebildet sind? Es sind kleine Sonnenbildchen, in ihrer Form lediglich durch die äußere Form des lichtstrahlenden Sonnenkörpers bedingt; hiervon überzeugt man sich am besten, wenn man solche Beobachtungen zur Zeit einer Sonnenfinsternis anstellt, wo wir das Tagesgestirn nicht mehr als eine runde Scheibe, sondern in sichelförmiger Gestalt am Himmelsgewölbe erblicken. Entsprechend dieser Form sind dann auch die kleinen Sonnenbildchen auf dem Boden keine kreisrunden Flecke mehr, sondern lauter sichelartig gestaltete Lichter (Abb. 426 u. 427).



426. Sonnenbilder bei freier Sonne.

Noch viel frappanter ist der folgende, leicht anzustellende Versuch: Man verdunkle ein Zimmer vollständig und bringe gegenüber dem Fensterladen, in den eine runde Öffnung von etwa 2,5 cm Durchmesser geschnitten worden ist, eine weiße Fläche an. Dazu kann man ein ausgespanntes weißes Tuch oder ein über einen Rahmen gespanntes weißes Papier benutzen. Sobald durch die enge Öffnung Licht einströmen kann, erscheint auf der gegenüberstehenden Wand ein Bild der gesamten äußeren Gegend, Wolken und Bäume, Häuser und Menschen, in den natürlichen Farben und in voller Bewegung, welche sie in Wirklichkeit besitzen, aber alles verkehrt auf dem Kopfe stehend. Je kleiner die Öffnung ist, um so schärfer sind die Umrisse, um so lichtschwächer ist aber auch dann das ganze Bild.

Nehmen wir zur Erläuterung dieses Falles einen einfachen Gegenstand, z. B. ein Gebäude an, von welchem Strahlen durch die enge Öffnung auf die Hinterwand des

Zimmers fallen sollen, so wird aus der Betrachtung der Abb. 428 klar, warum das Dach a nach unten, die Basis b nach oben gerichtet sich abbilden muß. Je näher man den Schirm der Öffnung bringt, um so kleiner, je weiter man ihn davon entfernt, um so größer, aber auch um so schwächer beleuchtet wird das Bild.

Es ist dies eigentlich schon eine Camera obscura, indessen der Apparat, den wir speziell mit diesem Namen bezeichnen, ist noch mit Spiegel und Linse versehen, um einesteils das Bild in aufrechte Stellung zu bringen und anderenteils in seinen Umrissen schärfer hervortreten zu lassen.

Eine einfache, die innere Einrichtung deutlich zeigende, transportable Form der Camera obscura ist in Abb. 429 dargestellt. Sie bildet einen viereckigen, rundum ge-

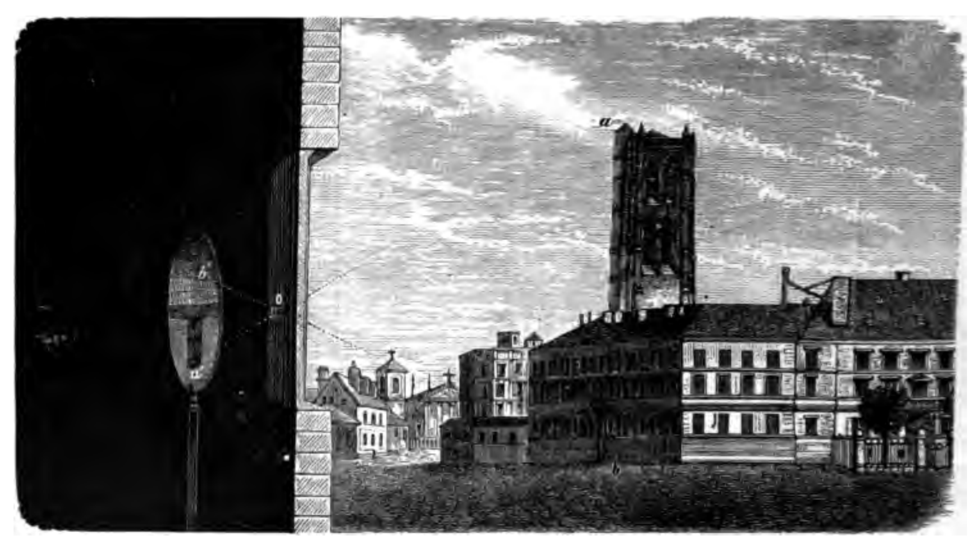


427. Sonnenbilder bei partialer Sonnenfinsternis.

schlossenen, im Innern geschwärzten Kasten und war früher besonders in Gebrauch zur Aufnahme von Landschaften, wozu sie sich recht geeignet erweist, weil man das Bild auf die Unterfläche eines geölten oder halb durchsichtigen Papiers werfen und die deutlich durchscheinenden Konturen auf der Oberfläche leicht nachzeichnen kann. Durch die in dem verschiebbaren Rohre R befindliche Linse L wird von dem äußeren Gegenstande ein reelles Bild entworfen und durch Reflexion an dem geneigten Spiegel S auf die aus mattgeschliffenem Glase oder transparentem Papier bestehende Platte k i projiziert. Der Deckel D dient als Blende, um die seitlich einfallenden Lichtstrahlen abzuschneiden. Die Camera obscura gehört zu den verbreitetsten optischen Instrumenten, denn jeder der Hunderttausende von Photographen bedient sich ihrer und muß sich ihrer bedienen. Sie ist schon um die Mitte des 16. Jahrhunderts (1558) von dem Neapolitaner Porta, welcher sich mit der Untersuchung der Augen beschäftigte, erfunden worden, hat indessen

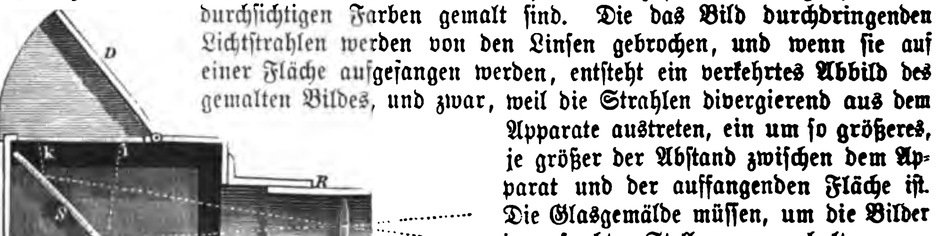
ihre hauptsächlichste Vervollkommnung erst in den letzten Jahrzehnten erfahren, seit sie aus ihrer früheren Rolle eines erheiternden Spielzeugs in die bedeutendere eines praktisch ungemein nützlichen Apparates getreten ist. Die photographischen Apparate besitzen nicht bloß eine einzige Linse, sondern ganze Linsensysteme, um die störende Wirkung sowohl der sphärischen wie der chromatischen Aberration zu beseitigen.

Die Laterna magica oder Zauberlaterne. Dieser Apparat ist schon lange bekannt und wahrscheinlich von dem Jesuiten Athanasius Kircher um 1640 erfunden worden; manche behaupten allerdings, Roger Baco habe sich schon vier Jahrhunderte früher derselben Vorrichtung bedient. In neuerer Zeit ist er wieder häufiger zur Erzeugung der sogenannten Nebelbilder, dissolving views, und zur vergrößerten Darstellung mikroskopischer Gegenstände benutzt worden. Ein Apparat für den letztgenannten Zweck heißt, je nachdem die Lichtquelle eine gewöhnliche Lampe oder ein in verbrennendem Hydro-oxygengas glühender Kalkkegel oder die Sonne ist, Skioptikon oder Sonnenmikroskop. In ihrer inneren Einrichtung unterscheiden sie sich nicht wesentlich von der Laterna magica. Diese besteht ihrem äußeren Ansehen nach aus einem ringsum ge-



428. Camera obscura.

schlossenen Kasten mit einem vortretenden Rohr an einer Seite. Im Innern befindet sich eine hellbrennende Lampe und hinter ihr zur Verstärkung der Beleuchtung ein Hohlspiegel, der alle Lichtstrahlen parallel nach vorn wirft. Das Rohr enthält zwei Konvexlinsen, am besten eine plankonvexe und eine bikonvexe, und zwischen der hinteren Linse und der Flamme, etwas hinter dem gemeinschaftlichen Brennpunkte beider Linsen, einen Spalt zum Einschieben von Glasplatten, auf welche die darzustellenden Gegenstände in durchsichtigen Farben gemalt sind. Die das Bild durchdringenden Lichtstrahlen werden von den Linsen gebrochen, und wenn sie auf einer Fläche aufgefangen werden, entsteht ein verkehrtes Abbild des gemalten Bildes, und zwar, weil die Strahlen divergierend aus dem Apparate austreten, ein um so größeres, je größer der Abstand zwischen dem Apparat und der auffangenden Fläche ist. Die Glasgemälde müssen, um die Bilder in aufrechter Stellung zu erhalten, umgekehrt eingeschoben werden. Die Bilder können entweder in einem dichten Rauche



429. Transportable Camera obscura.

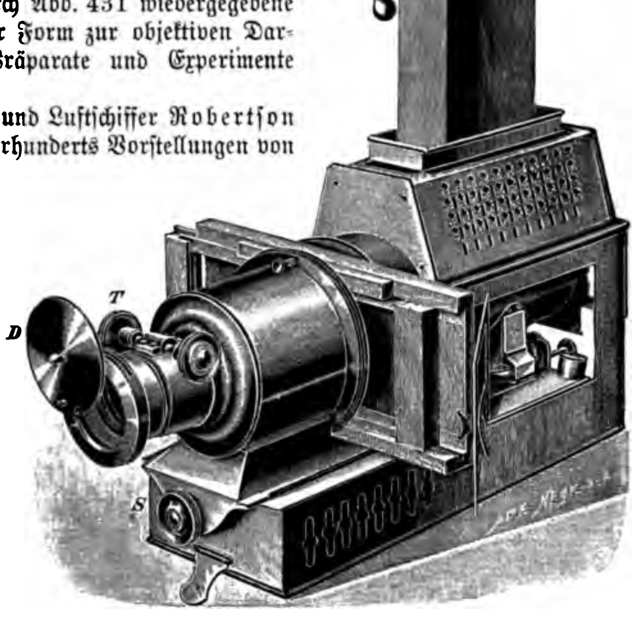
oder auf einer weißen Wand aufgefangen werden, welche man aus feinem weißen oder geöltem Papiere oder aus dünnem, über einen Rahmen gespanntem Musselin anfertigt.

Die Wirkung wird noch überraschend verstärkt, wenn die außerhalb des farbigen Bildes liegenden Stellen des Glases dunkel gemacht sind, so daß das Bild auf schwarzem Grunde hell hervortritt. Weiße Bilder, zur Darstellung z. B. von Geistererscheinungen, werden in schwarze Deckfarbe einradiert, mit welcher die Glasplatte auf einer Seite überzogen ist.

In Abb. 430 ist eine Zauberlaterne dargestellt, bei welcher als Lichtquelle Petroleumlicht, Gasglühlicht, Acetylen oder Drummondsches Kalklicht verwendet werden kann. Der Objektivträger kann mittels der Schraube S vor- und rückwärts bewegt werden, um den Bildhalter bequem einsetzen zu können. Das Doppelobjektiv selbst ist behufs genauer Einstellung gleichfalls mittels Trieb T und Zahnstange verstellbar und trägt vorn einen drehbaren Verschlußdeckel D, sowie einen Schlitz zum Einsetzen farbiger Gläser.

Ähnlich eingerichtet und wohl ohne nähere Beschreibung verständlich ist das durch Abb. 431 wiedergegebene Skioptikon, welches in dieser Form zur objektiven Darstellung wissenschaftlicher Präparate und Experimente recht geeignet ist.

Der bekannte Physiker und Luftschiffer Robertson gab gegen Anfang dieses Jahrhunderts Vorstellungen von Geistererscheinungen, die alle Welt in Erstaunen setzten. Lange Zeit vermochte niemand zu ergründen, welche Mittel hierbei in Bewegung gesetzt wurden, und es dauerte eine Reihe von Jahren, ehe das Geheimnis, nicht durch Erraten, sondern durch Verrat, an den Tag kam. Es war nichts anderes als die Zauberlaterne mit einigen mechanischen und theatralischen Zuthaten, von Robertson Phantaskop genannt. Man hat sich den Zuschauerraum durch eine Zwischenwand gänzlich von dem Raume getrennt zu denken, in welchem der Zauberer operiert. Ein inmitten dieser Wand befindlicher Schirm von aufgespanntem Musselin ist durch Drapierungen verhüllt, die erst dann fortgezogen werden, wenn vor Beginn der Vorstellungen alles verfinstert worden ist.

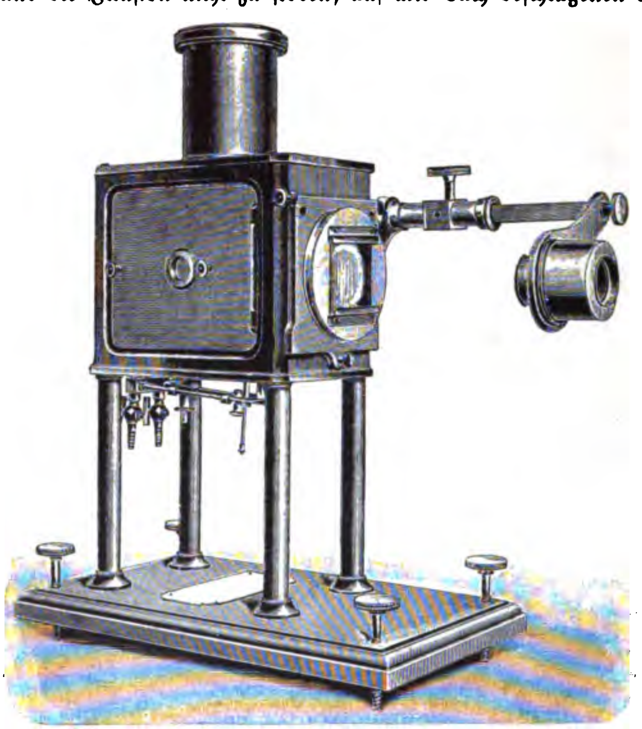


430. Einfaches Skioptikon.

Da aber auch hinter der Musselinwand alles andere Licht beseitigt ist, außer dem, welches aus dem Zauberkasten mit den Bildern kommt, so sieht man das leichte Gewebe nicht, sondern nur eine Figur, die frei in der Luft zu schweben scheint, bald dem Zuschauer erschreckend nahe rückt, bald sich in weite Ferne verliert. Diese Wandlungen werden nun ebenfalls in höchst einfacher Weise bewirkt. Je weiter der Zauberkasten von der Fläche absteht, auf welcher die Bilder erscheinen sollen, desto größer werden letztere; je näher der Kasten rückt, desto kleiner, in unmittelbarer Nähe natürlich nicht viel größer als die Öffnung des Linsenrohres. Die kleinen Bilder scheinen nun aber dem jenseits befindlichen Zuschauer entfernt, die großen nahe zu sein.

Durch Veränderung des Abstandes der beiden Projektionslinsen kann man die Umrisse mehr oder weniger deutlich hervortreten lassen, wodurch der Eindruck, daß das kleiner werdende Bild sich entfernt, täuschender wird. Um die Erscheinung noch natürlicher zu

machen, muß dafür Sorge getragen werden, daß die Bilder, wenn sie auf einen kleinen Raum zusammenrücken, nicht an Lichtstärke zu-, sondern vielmehr abnehmen. Dies wird ohne Schwierigkeit durch eine vor den Linsen befindliche verstellbare Blende bewirkt, die Robertson das Katzenauge nannte, und die man sich als eine Schere mit breiten, halbmondförmigen Blättern vorstellen muß, welche zu beiden Seiten der vorderen Linse liegen und sich so über derselben zusammenziehen lassen, daß jeder beliebige Grad von Lichtschwächung bis zur völligen Verdunkelung leicht hergestellt werden kann. Durch geschickte Kombination dieser Mittel also, Annäherung und Entfernung des Apparates, Veränderung der Lichtstärke und Verstellen der Linsen, werden jene Geistererscheinungen hervorgebracht. Eine passende Musik, etwas künstlicher Donner, Sturm oder Regen, dient zur Verstärkung des Eindrucks. Der Apparat wird, um jedes Geräusch auszuschließen und die Illusion nicht zu stören, auf mit Tuch beschlagenen Rädern unhörbar von einer Stelle zur andern gerollt.

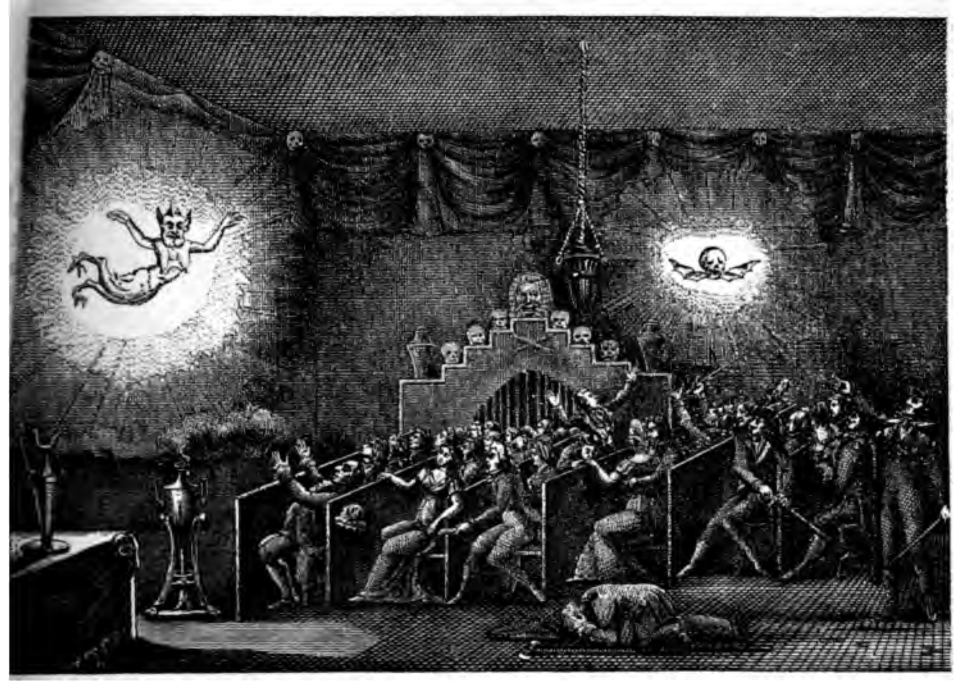

481. Skioptikon zur Darstellung wissenschaftlicher Präparate.

Die Anwendungen, welche von der Laterna magica und den verwandten Apparaten gemacht worden sind, beschränken sich indessen nicht auf solche gewöhnlichen Schaustellungen. Als ein außerordentlich nützliches Instrument hat sich die Laterna magica z. B. für die Einwohner von Paris während der langen Dauer der letzten Belagerung bewährt, indem es mit ihrer Hilfe allein möglich wurde, eine wenn auch beschränkte Korrespondenz über den „eisernen Gürtel“ der einschließenden Belagerungsheere weg zu unterhalten.

Wir wissen, daß die Beförderung von Briefen aus dem Innern der Stadt heraus — da sie durch die deutsche Cernierungslinie hindurch nicht stattfinden konnte — über dieselbe hinweg mittels Luftballons bewerkstelligt wurde. Allein wenn es auch möglich war, einen Luftballon zu expedieren mit der Aussicht, daß derselbe auf befreundetem Gebiete den Boden erreiche, wo sein Inhalt weiterbefördert werden könnte, so war es doch unausführbar, auf demselben Wege von außen in das Innere von Paris Nachrichten gelangen zu lassen. Zurückkehrende Brieftauben, welche man vorher mittels Ballon aus Paris hinausgeschafft hatte, boten dazu die einzige Gelegenheit. Diese ist auch in ausgedehnter und vortrefflich organisierter Weise benutzt worden, so daß man Briefe, Depeschen, ja ganze Zeitungsblätter mit Hilfe photographischer Apparate möglichst verkleinerte, dieselben auf einem Blatt zusammenstellte, welches so klein sein mußte, um in einer Federpose Raum zu finden, die man der heimkehrenden Taube unter den Flügeln befestigte. Die Franzosen bedienten sich gleich des photographischen Negativs für die Übersendung, wodurch sie zunächst den Vorteil gewannen, eine doppelte photographische Übertragung bei der Übersetzung zu umgehen, dann aber auch sicher waren, daß nur derjenige, welcher mit den gehörigen Apparaten zur Wiedervergrößerung versehen war, die Schrift entziffern konnte. Denn wie vorsorglich auch immer von unserer Seite der

…g geführt worden ist, an derartige photographische und mikroskopische Ausrüstung …e man doch nicht gedacht. In Paris wurden die Blätter, welche ganze Sammlungen … einzelnen Korrespondenzen enthielten, zuerst wieder photographisch vergrößert und … durch ein Lampen- oder Hydrooxygengasmikroskop auf eine helle Wand geworfen, von … die Depeschen abgelesen, abgeschrieben und an ihre speziellen Adressen befördert wurden.

… **Nebelbilder.** Durch die von England zu uns gekommenen Nebelbilderdarstellungen (…solving views) gewann die Zauberlaterne ein erneutes Interesse; denn mit keinem …deren Apparat können die bekannten, oft reizenden Effekte hervorgebracht werden. Nur … der Zauberkasten hier verdoppelt und das Zwillingspaar in eine solche Stellung zu …ander gebracht, daß beide mit ihren Öffnungen nach einem Punkte des Auffangschirmes …richtet sind, und ihre beiden Lichtkreise dort in einen zusammenfallen. Schiebt man in …n einen Kasten ein Glasbild, während das Licht des andern verdeckt gehalten wird, so



432. Vorführung von Geistererscheinungen mit Robertsons Phantaskop im Jahre 1797.

sieht man auch nur ein einziges Bild. Dasselbe soll sich aber vor unseren Augen in ein anderes verwandeln, welches in dem noch verdunkelten Kasten schon bereit steht.

Ein solcher **Nebelbilderapparat** (Doppelskioptikon) ist durch Abb. 433 dargestellt. Er besteht aus zwei einfachen Projektionslaternen, welche unter einem Winkel so neben einander gestellt werden, daß ihre Lichtkreise auf der Projektionswand sich decken, und aus einer Vorrichtung, durch deren Hin- und Herbewegung die Schwächung des Lichtes der einen Laterne und gleichzeitig die Verstärkung des Lichtes der anderen hervorgebracht wird. Dies wird in einfacher Weise dadurch erzielt, daß man die erste Lampe allmählich mittels des dissolvers oder Katzenauges abblendet und gleichzeitig in demselben Maße das Licht der anderen freigibt. Hierdurch fängt das bisher sichtbar gewesene Bild an zu erblassen und undeutlicher zu werden; denn in seine Farben und Konturen mischen sich allmählich die Umrisse des neuen Bildes, welche immer kräftiger werden und, wenn die Reste des ersten Bildes verschwinden, deutlicher hervortreten, bis das neue Bild in voller Klarheit vor uns steht. Wenn man sich keines Katzenauges bedienen kann, so ist der Lichtwechsel auch dadurch schon entsprechend hervorzurufen, daß man durch Auf-

oder Niederschrauben der Flamme den beiden Bildern eine verschiedene Helligkeit gibt. Die Verwandlung einer Sommerlandschaft in eine Winterlandschaft mit denselben Gebäuden, Bergen, Bäumen u. s. w. gelingt auf solche Weise fast unmerklich, und es ist im höchsten Grade überraschend, die Entwickelung eines völlig fremden Gemäldes zu sehen, dessen Übergänge wir durchaus nicht wahrzunehmen vermögen und das schon fertig vor unseren Blicken steht, ehe wir uns seiner völlig bewußt geworden sind.

Es gibt noch allerlei kleine Mittel, um Abwechselung in derartige Vorstellungen zu bringen. So kann man mehrere Gläser hinter einander aufstellen und durch Hin- und Herziehen des einen Bewegung in die Gegend bringen, einen Eisenbahnzug hindurchgehen lassen u. dergl. Schneefall z. B. wird dadurch dargestellt, daß man vor einer dritten Laterna magica einen langen, mit einer Stecknadel vielfach durchstochenen Papierstreifen mittels einer Kurbel von unten nach oben vorbeizieht.

Wundercamera. Eine sehr interessante Erweiterung hat der Optiker Krüß in Hamburg der Laterna magica gegeben und unter dem Namen Wundercamera in den Handel gebracht. Während man nämlich bei der üblichen Einrichtung der Laterna magica darauf beschränkt ist, durchsichtige Gegenstände zu projizieren, also vorzugsweise Gemälde und Zeichnungen auf Glas, die durch Hervortreten ihrer Konturen und durchsichtigen Farben wirken, hat Krüß eine Anordnung erfunden, welche erlaubt, auch undurchsichtige Gegenstände, Bilder auf Papier, Medaillen, Blumen, das Zifferblatt einer Uhr mit seinen fortrückenden Zeigern u. s. w. vergrößert auf einem Schirm zu entwerfen. Er setzt die betreffenden Gegenstände in einem dunklen Kasten einer sehr hellen und nur auf sie konzentrierten Beleuchtung mittels einer Lampe und eines Hohlspiegels aus und läßt die von ihnen reflektierten, intensiven Strahlen durch eine Linse gehen, durch welche auf einer entfernten weißen Wand vergrößerte Bilder erzeugt werden. Man kann mittels dieses einfachen Apparats einen schönen Effekt hervorbringen, vorausgesetzt, daß die angewandte Lichtquelle genügend intensiv ist; sonst fallen die erzeugten Bilder schwach und verwaschen aus, da nur Licht zur Wirkung kommt, welches von Gegenständen reflektiert wird, die den größeren Teil des auf sie fallenden Lichtes absorbieren.

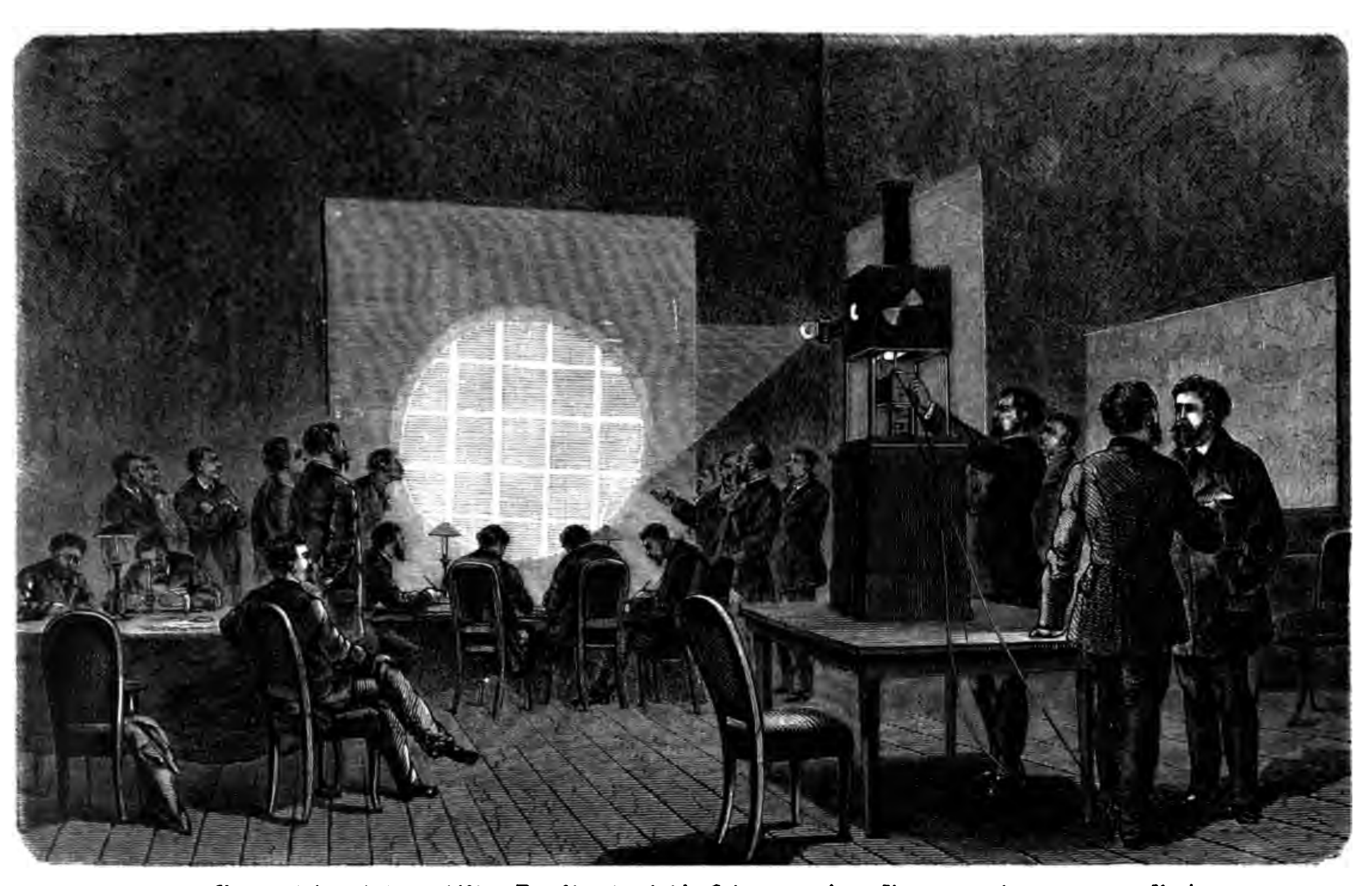


433. Doppelskioptikon (Nebelbilderapparat).

Das Auge. Panorama, Chromatrop und Stereoskop.

Das Auge ein optisches Instrument. Seine Einrichtung und Fähigkeit. Nativistische und empiristische Theorie des Sehens. Sehwinkel. Perspektive. Hilfsmittel für das perspektivische Zeichnen. Panoramen und Dioramen. Geschwindigkeit und Dauer des Lichteindrucks. Das Chromatrop, Zootrop, Schnellseher. Kinematograph. Subjektive Gesichtserscheinungen. Sehen mit zwei Augen. Das Stereoskop und seine Geschichte. Wheatstonesches und Brewstersches Spiegel- und Prismenstereoskop. Das Telestereoskop von Helmholtz. Das Doppelfernrohr von Zeiß.

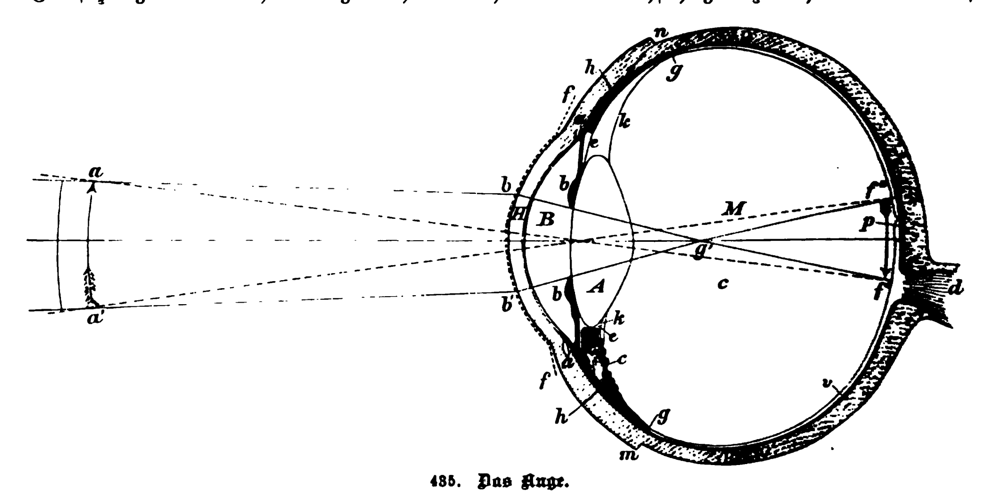
Wir tragen fortwährend mit uns eine vollkommene Camera obscura herum. Die Apparate der Photographen liefern uns Bilder, welche wir in ihren Einzelheiten mit Hilfe des Mikroskops zu betrachten im stande sind, unser Auge ist ein viel feinerer Apparat. Die scheinbaren Schwierigkeiten, welche lange Zeit einer zureichenden Erklärung des Sehens entgegenstanden, fallen bei Anwendung einer richtigen Methode der Untersuchung des Auges von selbst fort, und wir bewundern die Natur wegen der Einfachheit der Ursachen und Gesetze, mit der sie beim Bau des Auges so wunderbare Wirkungen hervorzubringen weiß.



434. Reproduktion photographischer Depeschen durch die Laterna magica während der Belagerung von Paris.

Um einen Einblick in die Thätigkeit des Auges zu gewinnen, mußte man zunächst dessen innere Einrichtung kennen lernen. Mit scharfem Messer zertrennte der Anatom entschlossen die Hülle, welche jahrhundertelang den Einblick ins Auge hinderte, zerlegte es in seine einzelnen Bestandteile, um deren Fähigkeiten zu untersuchen und in ihrer Gesamtwirkung zu prüfen — und so ward es Licht. Einem solchen Anatomen wollen wir uns jetzt zur Einführung in die innere Werkstatt des Auges anvertrauen.

Er nimmt ein Ochsenauge (denn die Augen der höher organisierten Wirbeltiere sind alle der Hauptsache nach ähnlich eingerichtet) und macht uns zunächst auf dessen kugelige Form (Augapfel) aufmerksam, welche wir auch aus Abb. 435 erkennen. Der Augapfel ist in seinem größeren, hinteren Teile von der undurchsichtigen, weißen Sehnenhaut (tunica sclerotica) P P umgeben, deren vorderer Teil von der durchsichtigen und stärker gewölbten knorpeligen Hornhaut (cornea) H gebildet wird. Die Innenflächen der sclerotica werden, bis zu ihrer Vereinigung mit der cornea von der Aderhaut (chorioidea) g ausgekleidet, die größtenteils aus feinen Blutgefäßen besteht und auf ihrer Innenseite mit einer schwarzen Pigmentschicht zur Verhinderung der Reflexion bedeckt ist. Das Pigment fehlt bei den sogenannten Albinos unter Menschen und Tieren, z. B. dem Kaninchen. Als Fortsetzung der Aderhaut liegt nicht weit hinter der durchsichtigen Hornhaut die runde,



435. Das Auge.

gefärbte Regenbogenhaut oder Iris a b b a, nach deren Farbe man das Auge ein braunes, blaues u. s. w. nennt. Die Regenbogenhaut enthält ein System ringförmiger und radialer Muskelfasern, mittels deren die große, runde Öffnung in der Iris, die Pupille b b, verengt oder erweitert und so die in das Auge eingelassene Lichtmenge nach Bedürfnis reguliert werden kann. Durch die Pupille treten von außen kommende Lichtstrahlen in die Krystalllinse A, von welcher sie gebrochen und zu einem verkleinerten Bilde auf der Hinterwand des Auges, der Netzhaut oder Retina p v, vereinigt werden. Die Netzhaut ist die äußerst feine Ausbreitung des Sehnerven d, der die Lichteindrücke dem Gehirn übermittelt.

Die Eintrittsstelle des Sehnerven in die Aderhaut liegt nicht der Pupille genau gegenüber in der Achse des Auges, sondern etwas seitlich nach dem anderen Auge zu und ist dadurch bemerklich, daß die Netzhaut an dieser Stelle, dem Mariotteschen blinden Fleck, empfindungslos ist. Zum Nachweis des blinden Fleckes dient Abb. 436. Man schließe das linke Auge, fixiere mit dem rechten das weiße Quadrat und nähere die Abbildung dem Auge bis auf etwa 25 cm. Der weiße Kreis wird verschwinden, weil die von ihm ausgehenden Strahlen die Netzhaut innerhalb des blinden Fleckes treffen, während das Kreuz sichtbar bleibt. Bemerkenswert ist ferner der gelbe Fleck (macula lutea) etwas unterhalb p, als die Stelle, an der die Lichteindrücke am deutlichsten wahrgenommen werden, und auf die das Bild desjenigen Gegenstandes fällt, auf den wir die Augenachse richten. Er ist für das Sehen der wichtigste Teil der Netzhaut.

Die Krystalllinse A ist ein durchsichtiger, farbloser, bikonvexer Körper, dessen vordere, der Pupille zugewandte Fläche weniger gewölbt ist als die hintere. Sie besteht aus zahlreichen, über einander gelagerten Schichten, deren Konsistenz und Lichtbrechungsvermögen nach außen hin abnimmt. Sie wird von der Linsenkapsel umschlossen und durch den Muskel h, den Strahlenkörper (ligamentum ciliare), in ihrer Lage dicht hinter der Iris festgehalten. Der innere Raum c hinter der Linse ist mit einer durchsichtigen, gallertartigen Masse, der Glasfeuchtigkeit oder dem Glaskörper (humor vitreus), ausgefüllt. Der vordere Raum B zwischen Hornhaut und Linse enthält das klare, etwas salzige Kammerwasser (humor aqueus).

Treten nun von a a' Lichtstrahlen ins Auge, so erleiden sie gleich vorn an der durchsichtigen Hornhaut bei b b' eine Ablenkung, und zwar die bedeutendste, denn die einzelnen Medien, die der Lichtstrahl bis zur Netzhaut passieren muß, sind unter sich in ihren Brechungsverhältnissen nur wenig verschieden. Die Linse ist gewissermaßen nur der Verfeinerungsapparat; sie bewirkt vermöge des Strahlenkörpers bei einem normalen Auge durch ein Vor- und Zurücktreten, sowie durch gewisse Änderungen in ihren Krümmungsverhältnissen, daß die Strahlen, sie mögen parallel oder mehr oder weniger konvergent ankommen, sich immer auf der Netzhaut zu einem scharfen Bild in f' f'' vereinigen, und ermöglicht dadurch also ein deutliches Sehen in ganz verschiedenen Entfernungen. Außerdem aber ist es wahrscheinlich ihre Aufgabe, die Bilder achromatisch zu machen. Die



486. Zum Nachweis des blinden Fleckes.

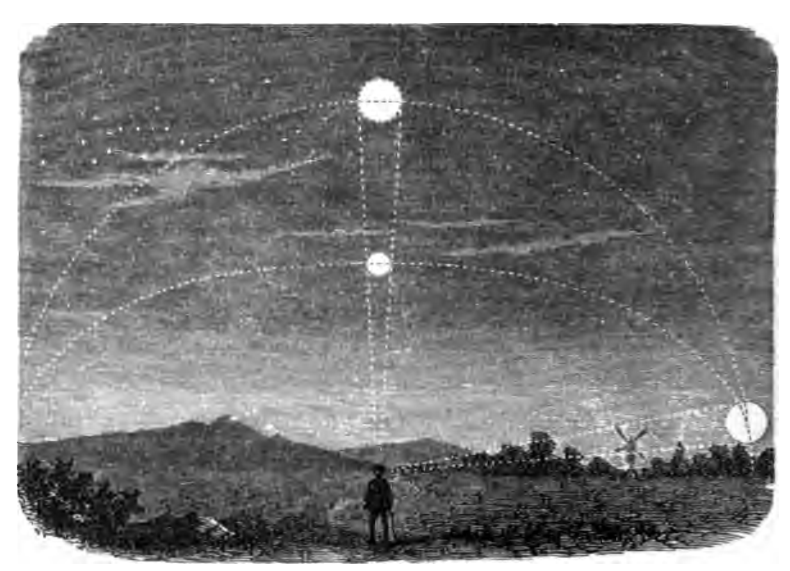
Entfernung, bis zu welcher ein Gegenstand vom Auge fortrücken kann, um noch deutlich gesehen zu werden, hat ihre Grenze, die allerdings verschiedene Werte hat; Geschriebenes zum Beispiel vermögen normale Augen gewöhnlich nur in einem Abstande zwischen 20 und 45 cm klar zu erkennen. Diese Entfernung heißt die Sehweite. Als normale Sehweite pflegt man eine Entfernung von 25 cm vom Auge anzunehmen.

Ist die Linse so beschaffen, daß für die aus normaler Sehweite kommenden Strahlen der Vereinigungspunkt oder das Bild vor die Netzhaut fällt, so werden diejenigen Strahlen, die aus größerer Nähe ins Auge gelangen, sich auf der Netzhaut zu einem scharfen Bilde vereinigen können; Strahlen von entfernteren Objekten dagegen, die ihren Vereinigungspunkt vor der Retina haben, werden auf letzterer selbst nur undeutliche Bilder hervorbringen, weil an dieser Stelle die Strahlen schon wieder unter einander divergieren. Solche Augen nennt man kurzsichtige, die Linse hat eine zu kurze Brennweite, sie ist zu sehr gekrümmt. Durch Anwendung entsprechender Zerstreuungslinsen läßt sich diesem Übelstande begegnen; daher sind auch die Brillengläser für Kurzsichtige bikonkave Linsen. Bei Weitsichtigen gilt das Umgekehrte: das deutliche Bild würde erst hinter der Netzhaut entstehen, die Strahlen müssen also durch Anwendung konvexer Gläser konvergenter gemacht werden.

Die Fähigkeit, die Krystalllinse im Auge entsprechend den verschiedenen Entfernungen der Objekte mittels des Ciliarmuskels mehr oder weniger stark krümmen zu können, um sie deutlich zu sehen, nennen wir die Akkomodation des Auges für die Entfernung der Objekte. Wahrscheinlich hat die hierzu notwendige Muskelthätigkeit einen nicht unbedeutenden Einfluß auf unsere Vorstellung von der Entfernung; wir vermögen auch mit

nur einem Auge zu unterscheiden, welcher Punkt von zweien der nähere und welcher der entferntere ist; jedoch können wir mit einem Auge Entfernungen weit weniger genau schätzen, als mit beiden. — Nicht alle Punkte der Netzhaut rufen gleich scharfe Eindrücke hervor. Wenn wir ein Objekt genau sehen wollen, richten wir unser Auge so, daß die von ihm ausgehenden Strahlen in die Augenachse fallen. Ist sonach das Sehfeld immer nur ein beschränktes, und können wir demzufolge ausgedehntere Bilder nicht auf einmal in allen Teilen gleich scharf unterscheiden, so wird doch diese scheinbare Unvollkommenheit aufgehoben durch die außerordentliche Beweglichkeit des Auges, die uns gestattet, mit großer Schnelligkeit jeden Punkt in die Richtung der Augenachse zu bringen.

Nativistische und empiristische Theorie des Sehens. Das von der Linse auf der Netzhaut erzeugte Bild ist verkehrt und sehr verkleinert. Es ist lange Zeit Gegenstand weitläufiger Untersuchungen und Diskussionen der Physiologen gewesen, warum wir, obgleich die Bilder auf der Netzhaut verkehrt erscheinen, doch alle Gegenstände in der richtigen Stellung erblicken. Zwei Theorieen stehen sich in dieser Hinsicht einander gegen-

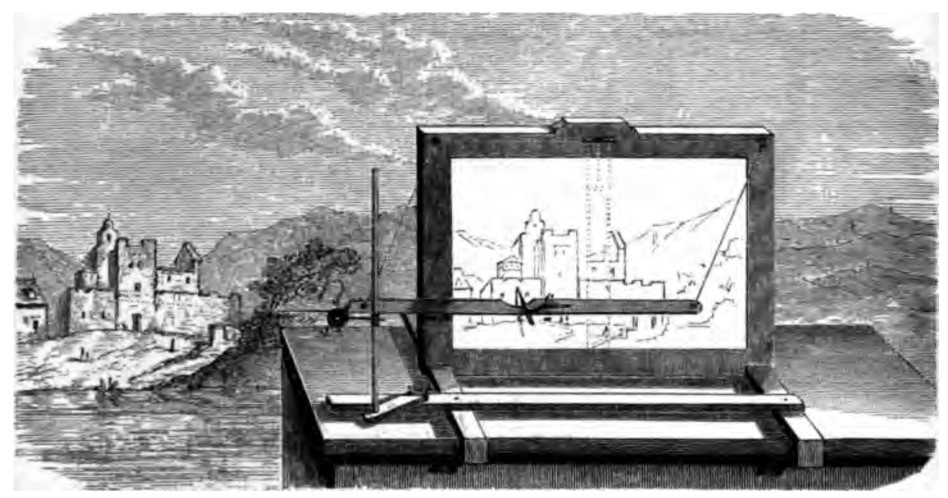


437. Verschiedenheit der scheinbaren Größe des Mondes.

über: die nativistische und die empiristische Theorie. Der nativistischen Theorie zufolge sind gewisse, durch den Gesichtssinn gewonnene Anschauungen uns angeboren und beruhen nicht auf Erfahrungen. Hierbei wird entweder angenommen, daß die Seele eine direkte Kenntnis von der räumlichen Ausdehnung der gereizten Netzhautstellen habe, oder daß infolge der Reizung bestimmter Nervenfasern gewisse Raumvorstellungen vermittelst eines uns angeborenen, nicht weiter definierbaren Mechanismus entstehen. Nach der empiristischen Theorie, der man, gestützt auf eine Reihe optischer Untersuchungen, den Vorzug vor der nativistischen einräumt, sind die durch den Gesichtssinn gewonnenen Anschauungen nicht angeboren, sondern erst durch Erfahrung und durch Übung bedingt. Der Hauptsatz der empiristischen Theorie ist nach Helmholtz der, daß die Sinnesempfindungen für unser Bewußtsein Zeichen sind, die zu deuten erst unserem Verstande überlassen wird. Wird unsere Netzhaut dadurch, daß von einem außerhalb gelegenen Gegenstande Lichtstrahlen auf sie fallen, gereizt, so kommt die Empfindung des Nervenreizes uns nicht als solche zum Bewußtsein, sondern wir projizieren sie unwillkürlich nach außen hin und zwar nach derjenigen Richtung, in welcher sich eben die Gegenstände, welche die Netzhautbilder veranlassen, befinden, und so sehen wir die Gegenstände in richtiger Stellung, weil wir dies auf dem Wege der Erfahrung, durch andere sinnliche Wahrnehmungen, z. B. den Tastsinn, bestätigt finden.

Die **scheinbare Größe** eines Gegenstandes bestimmen wir durch die Größe des Sehwinkels, d. h. desjenigen Winkels, welchen die von seinen äußersten Punkten nach unserem Auge gehenden Strahlen einschließen. Mit diesem Sehwinkel kombinieren wir seine Entfernung von uns und gewinnen, bei richtiger Schätzung derselben, eine Vorstellung von seiner **wirklichen Größe**. Wieviel dabei auf die letztere Schätzung ankommt, beweist die immer wieder auftauchende Behauptung, daß der Mond, wenn er tief am Horizonte steht, größer erscheine als hoch oben am Himmel. Diese allerdings merkwürdige Täuschung hat ihren Grund nicht in einer Verschiedenheit des Sehwinkels, unter welchem er erscheint — denn derselbe ist für beide Stellungen vollkommen gleich — sondern sie beruht höchst wahrscheinlich darauf, daß wir wegen der verschiedenen Dichte der Luftschichten am Horizont und im Zenith das Himmelsgewölbe, an welchem uns die Gestirne gleichsam angeheftet erscheinen, nicht als eine Halbkugel, sondern als ein flaches Gewölbe ansehen und infolgedessen dem tiefstehenden Monde eine größere Entfernung zuschreiben, als dem über uns stehenden (Abb. 437).

Um einen Gegenstand noch sehen zu können, darf der Gesichtswinkel, unter welchem er uns erscheint, nicht unter einer gewissen Grenze liegen, welche indessen von der Hellig-



438. Wrens Apparat zur perspektivischen Aufnahme von Landschaften.

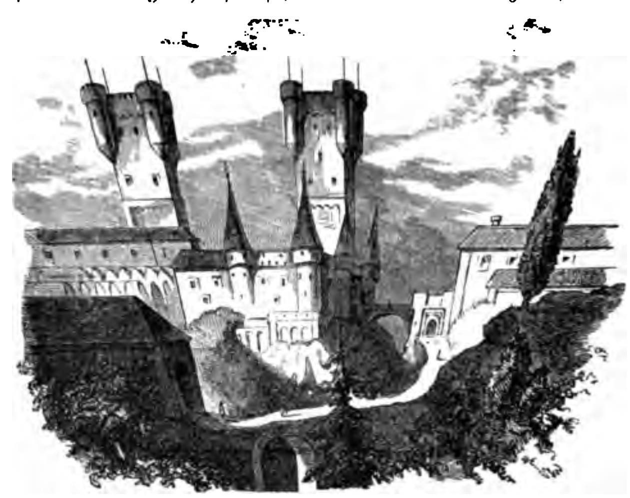
keit und Farbe des Gegenstandes, ferner von der Natur des Hintergrundes abhängig ist und zwischen 2 bis 30 Sekunden schwankt.

Auf der Änderung des Sehwinkels dagegen mit zunehmender Entfernung basiert die **Perspektive**, durch deren Berücksichtigung die durch Zeichnung dargestellten Gegenstände jenen anschaulichen Eindruck hervorbringen, den sie in Wirklichkeit haben. Das Erkennen und Befolgen der Regeln der Perspektive setzt eine scharfe Naturbeobachtung voraus; wir treffen daher perspektivische Zeichnungen erst bei Völkern, die sich auf einer höheren Bildungsstufe befinden. Aus dem Mittelalter besitzen wir noch viele Gemälde und Zeichnungen, welche in Bezug auf die Tiefe, das Vor- und Hintereinander der Gegenstände mit den wunderlichen chinesischen Darstellungen große Ähnlichkeit haben.

Um Landschaften, Statuen und dergleichen im Bilde auf einer Fläche möglichst so wiederzugeben, wie sie uns erscheinen, hat man verschiedene Hilfsmittel. Am einfachsten könnten wir den Zweck erreichen, wenn wir zwischen Auge und abzubildendem Gegenstande eine Glastafel aufrichten und auf dieser die Konturen direkt nach der Natur verzeichnen würden. Aber jede Verrückung des Auges würde auch eine Verrückung des Bildes zur Folge haben. Man hat daher in der durch Abb. 438 dargestellten Vorrichtung (um die Mitte des 17. Jahrhunderts von dem Mathematiker und Architekten **Wren** angegeben) dem Auge einen sicheren Stand gegeben, indem mit der Zeichenfläche

ein Visier a fest verbunden ist, durch dessen kleine Öffnung der Zeichner die Landschaft betrachtet. Das Bild wird dann nicht auf einer Glastafel, sondern gleich auf einer weißen Papierfläche entworfen. Es dient dazu ein storchschnabelähnlicher Rahmen, welcher den Bleistift c trägt und mit einem Zeiger b versehen ist, dessen markiertes Ende vor dem Auge des Beschauers über die Umrisse der Landschaft hingeführt wird. Dieser Zeiger ist durch eine feine Spitze in unserer Abbildung angegeben, dicht hinter dem kleinen Visier, mit dem er nicht etwa, wie es in der Abbildung scheinen könnte, fest vereinigt ist.

Das Panorama. Bis zu welchem Grade der Täuschung aber eine perspektivisch richtige Zeichnung uns führen kann, beweisen am besten die Panoramen. Dies sind Gemälde, welche eine Landschaft oder eine Szene für den Beschauer so darstellen, als ob er sich mitten darin befindet. Die Leinwand, auf welche sie aufgetragen sind, ist deshalb in einem runden Gebäude aufgespannt, so daß sie den Beschauer von allen Seiten umgibt. Auf seinen Standpunkt ist die Perspektive des Gemäldes berechnet, und weil es auch nur von dem Punkte aus, für welchen die Zeichnung entworfen ist, betrachtet werden kann, ist für den Beschauer ein besonderes Podium erbaut. Von einem anderen als dem berechneten Punkte aus gesehen, erscheinen die Bilder verzerrt, wie ungefähr Abb. 439, und auch von dem richtigen Standpunkte aus betrachtet werden sie erst dann die täuschende Vorstellung erwecken, daß wir eine räumliche und nicht eine Flächendarstellung vor uns haben, wenn man alle Nebeneindrücke, welche jene Illusion stören könnten, beseitigt. Die hier dargestellte Zeichnung erscheint nahezu unverzerrt, wenn man sie durch eine in einem Kartenblatt befindliche Öffnung von etwa der Größe einer Stecknadelkuppe betrachtet. Zu diesem Zwecke ist die Karte so aufzustellen, daß sie sich 7,5 cm vor der horizontal liegenden Abbildung und die Öffnung in 7,5 cm Höhe über derselben befindet; durch dieses Visier betrachtet man nach einander die einzelnen Teile der Abbildung.



439. Perspektivische Landschaft für das Panorama.

In ähnlicher Weise sind nun die Panoramen hergestellt. Da schon Albrecht Dürer (1471—1528) die Regeln der Perspektive in exakter Weise entwickelt und begründet hat, ist es nicht unwahrscheinlich, daß bereits zu seiner Zeit kleine Panoramen gemalt worden sind. Breisig in Danzig soll 1763 ein kleines Panorama gezeigt haben, ein im großen Stile ausgeführtes ist indessen erst im Jahre 1793 Gegenstand öffentlicher Schaustellung geworden. In diesem Jahre nämlich richtete Robert Barker in London ein Panorama ein, welches die Gegend von Portsmouth und die Insel Wight darstellte. In Deutschland wurde das Londoner Panorama erst im Jahre 1800 gezeigt. Von dieser Zeit an wurden sie vielfach ausgeführt und zur Schau gestellt, namentlich haben die Pariser Panoramen, die ersten von dem Landschaftsmaler Prévost, großen Ruf erlangt. Der Name der Passage des Panoramas in Paris erinnert heute noch an den Ort der ersten Ausstellung. Vor etwa 70 Jahren befand sich hier Prévosts Panorama, bestehend aus zwei Rotunden von etwa 15 m Durchmesser, mit einer runden Zuschauerbühne von etwa 6 m Durchmesser in der Mitte. Das Publikum war entzückt von den Darstellungen und veranlaßte bald die Erbauung eines noch größeren Gebäudes.

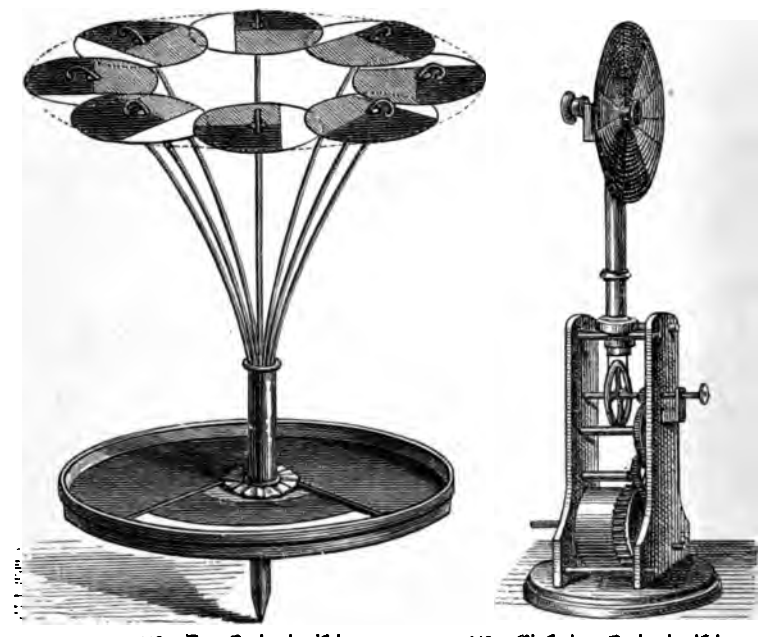
Nach Prévosts Tode führte der Oberst Langlois den Parisern die Hauptepisoden der kaum beendeten Feldzüge, denen er selbst beigewohnt hatte, in seinem Panorama vor

Augen. Es stand in der Rue des Marais du Temple und hatte einen fast dreimal so großen Durchmesser als das von Prévost. Das Bild der Seeschlacht bei Navarin, welches Langlois zuerst zur Anschauung brachte, wußte er dadurch sehr täuschend herzustellen, daß er der für die Zuschauer bestimmten Bühne die Form des Hinterdecks eines voll-



440. Zur Erklärung des Farbenkreisels. 441.

ständig ausgerüsteten und mit 74 Kanonen besetzten Kriegsschiffes gab, während die das Gebäude stützende Mittelsäule zu einem Mastbaum gemacht und nur das andere Ende des Schiffes gemalt war. Die Leinwand schloß sich unmittelbar an das Hinterdeck und lenkte den Blick auf die bewegte See und die kämpfenden Schiffe. Später baute Langlois ein neues großes Panorama, in welchem ebenfalls die Schlachten des französischen Heeres die Hauptobjekte der Darstellung bildeten; dasselbe mußte aber gelegentlich der großen Ausstellung von 1855 abgebrochen werden. Unter den neueren Pariser Panoramen ist dasjenige, welches einen Blick auf die Stadt während der Belagerung von Fort d'Issy aus darstellt, bezüglich seiner perspektivischen Wirkung eins der vollendetsten.



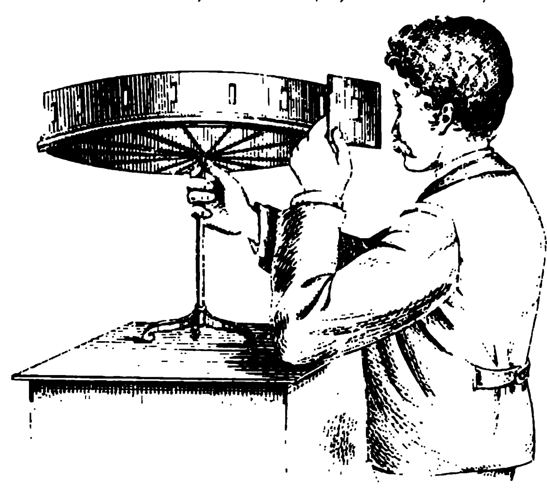
442. Der Farbenkreisel. 443. Einfacher Farbenkreisel.

Das berühmte Panorama von London, welches Thomas Horner während der Restaurierung der Kuppel der Paulskirche aufnahm, fand in einer ungeheuren Rotunde im Regentspark Aufstellung. Die Zuschauer sahen gleichsam aus der kleinen, durchsichtigen Laterne der Kuppel von St. Paul und mußten in dem Bau umhergehen, um die einzelnen Partieen des Panoramas bewundernd genießen zu können. In Deutschland hat sich besonders der Maler Lexa durch seine Panoramen einen Namen gemacht.

In der neuesten Zeit jedoch sind dieselben wesentlich übertroffen worden durch die großen Panoramen von Schlachten aus dem deutsch-französischen Kriege, zu deren Ausführung sich Künstler ersten Ranges verbunden haben. Wer hat nicht in Berlin die Dar-

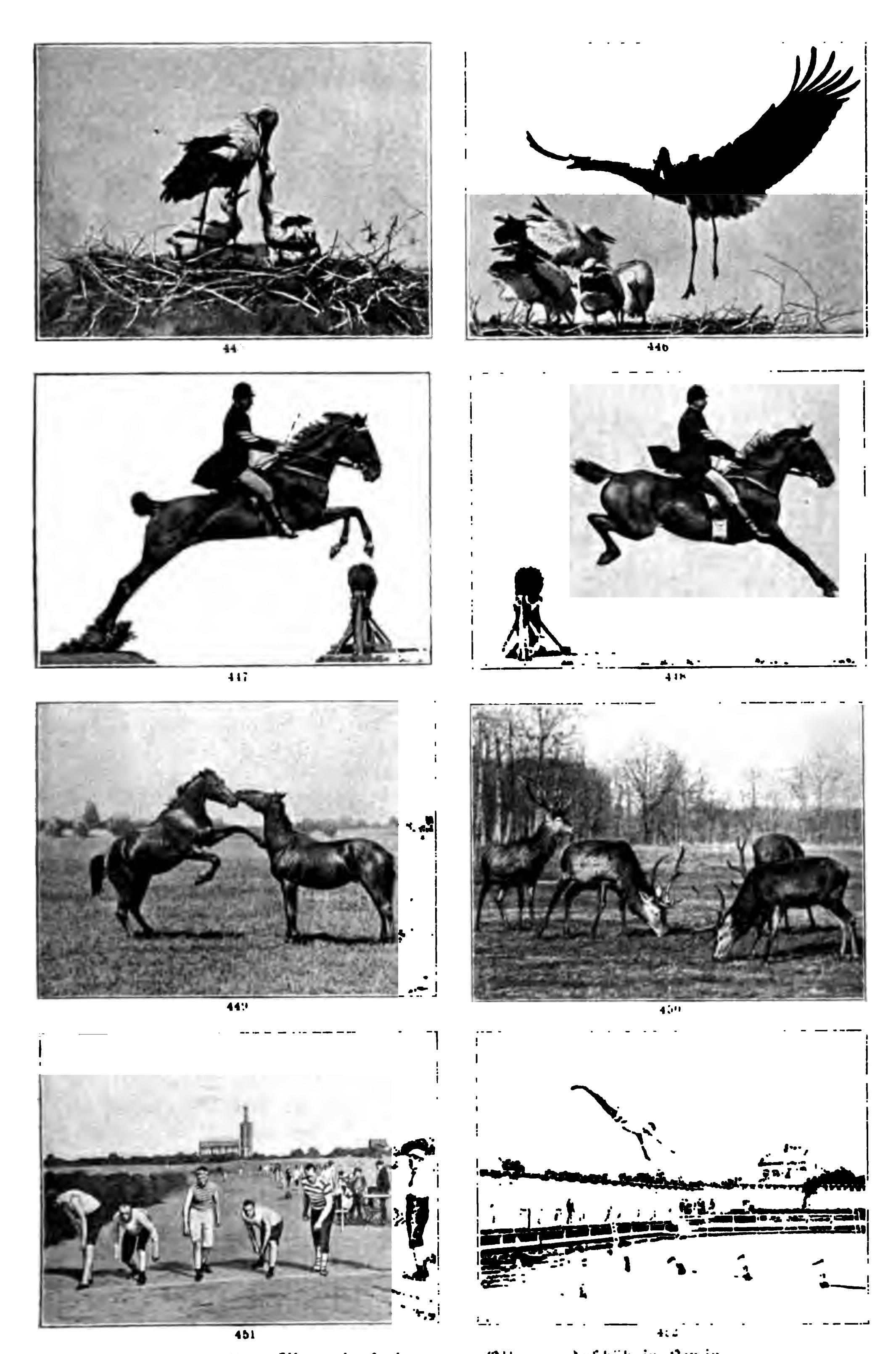
stellung der Schlacht von Gravelotte durch Camphausen, ferner der von Sedan durch A. v. Werner, wer nicht in München den Kampf der bayrischen Truppen bei Wörth, in Dresden die Erstürmung von St. Privat bewundert? — anderer ähnlichen Darstellungen nicht zu gedenken, wie sie jetzt in fast allen großen Städten Deutschlands zu dauernder Aufstellung gelangt sind oder gelangen.

Während die Wirkung der Panoramen hauptsächlich auf der Perspektive beruht, ist es bei den von Daguerre, dem Erfinder der Daguerreotypie, zuerst hergestellten Dioramen die eigentümliche Beleuchtung, welche nicht minder überraschende Effekte hervorbringt. Eine große durchscheinende Seidenfläche wird auf beiden Seiten in verschiedener Weise bemalt. Auf der Vorderseite trägt sie z. B. das Bild einer sonnenbeleuchteten Landschaft, während die Rückseite für dasselbe Bild einen bewölkten Himmel, ein Schneegestöber oder dergleichen aufweist. Die Farben werden mit Rücksicht auf die Lichtdurchlässigkeit des Stoffes besonders ausgewählt, und man kann, je nachdem das Licht entweder nur auf die Vorder- oder nur auf die Rückseite fällt, diese beiden Effekte gesondert und rasch nach einander zur Darstellung bringen, durch gleichzeitige Wirkung des von vorn auffallenden und des von hinten durchscheinenden Lichtes aber außerdem noch höchst frappante Abwechselungen hervorrufen. Eins der vollendetsten Dioramen ist wohl das Sündflutdiorama, welches im Jahre 1896 längere Zeit hindurch im Passage-Panoptikum in Berlin ausgestellt war.


444. Wundertrommel (Zootrop).

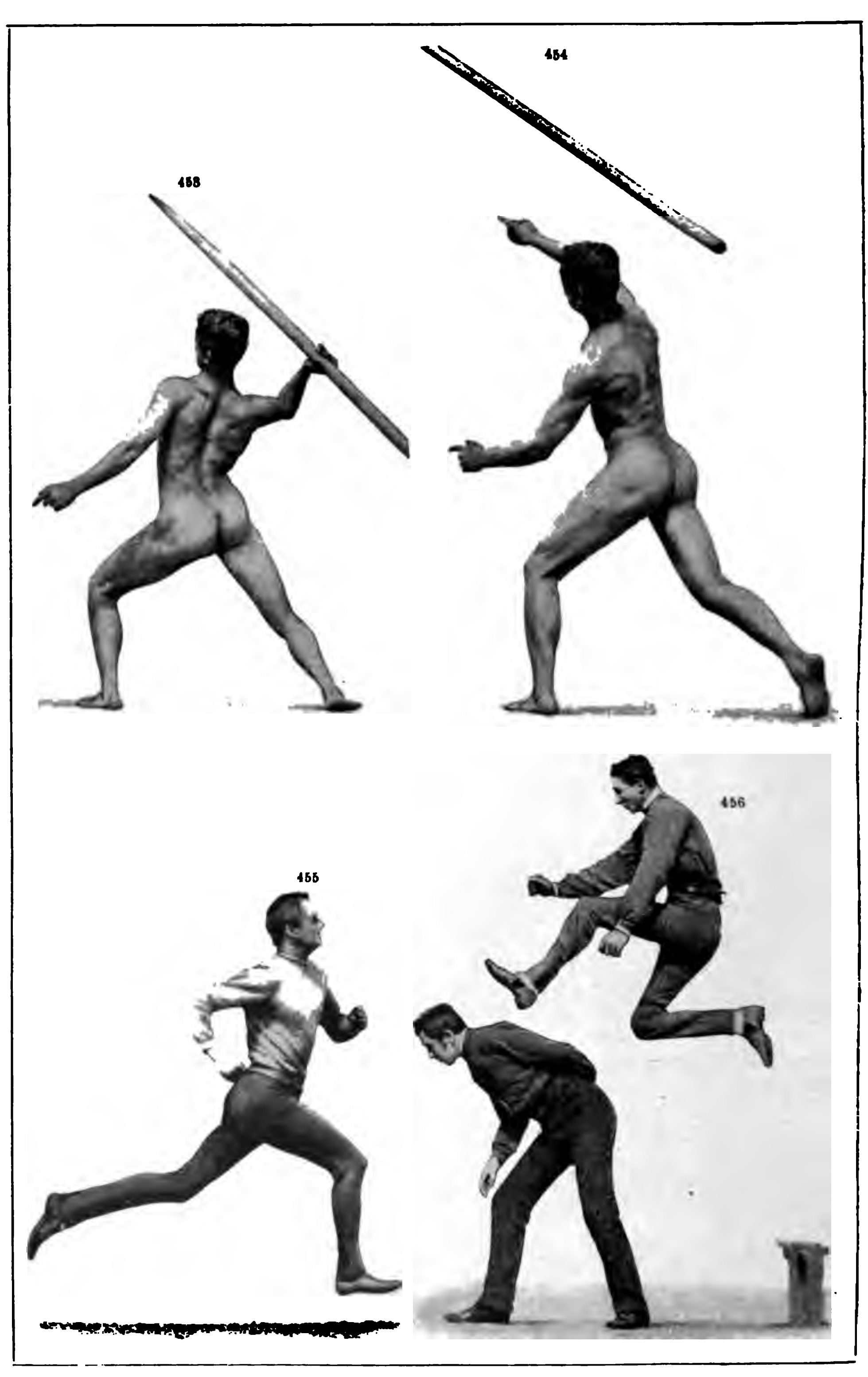
Geschwindigkeit und Dauer des Lichteindruckes. Wir sehen nicht in demselben Augenblicke, in welchem das Licht die Netzhaut unseres Auges trifft. Die Nerven brauchen eine gewisse Zeit, um den empfangenen Lichteindruck bis zum Gehirn weiter zu leiten, und das Gehirn braucht wieder Zeit, um sich des Lichtreizes bewußt zu werden, d. h. zu sehen. Natürlich sind diese Zeitintervalle außerordentlich klein, so klein, daß sie sich der gewöhnlichen Beobachtung entziehen; aber trotzdem haben die Physiker und Physiologen exakte Methoden erfunden, um die Geschwindigkeit der Fortpflanzung und Auslösung des Lichtreizes sicher zu messen. Es hat sich ergeben, daß die Zeit, welche verfließt zwischen dem Lichteindruck und dem Sichbewußtwerden desselben, eine verschiedene ist nicht nur für verschiedene Beobachter, sondern auch für einen und denselben Beobachter, je nach dem Gemütszustande oder der körperlichen Disposition desselben, deren Wert 0,1 Sekunde und darüber erreicht. Man nennt dieses Zeitintervall die persönliche Gleichung des Beobachters, welcher z. B. bei astronomischen Messungen, Zeitbestimmungen u. s. w. Rechnung getragen werden muß.

Wie nun das Auge die Lichteindrücke nicht ohne Zeitverlust empfängt, so verschwinden dieselben auch nicht plötzlich, sondern bleiben noch eine gewisse Zeit lang, auch wenn die Ursache des Lichtreizes nicht mehr da ist. Wenn wir einen glimmenden Span in einem finsteren Zimmer um unsern Kopf schwenken, so dehnt sich der leuchtende Punkt scheinbar zu einem leuchtenden Schweife aus, der bei genügend rascher Bewegung in einen feurigen Kreis übergeht. Der Blitz ist ein einziger, momentan auftretender Funke, er erscheint uns aber wie ein zickzackförmiges Band, weil der Eindruck noch einige Zeit nach dem Vergehen des Netzhautbildes als sogenanntes Nachbild sich erhält; und wenn wir auch die Erzählung jenes Reisenden von der Schnelligkeit amerikanischer Eisenbahnfahrten, der zufolge die Telegraphenstangen so rasch vor den Augen vorüberflogen, daß sie wie ein zusammenhängender Pfostenzaun aussahen, nicht als aus „ganz guter Quelle" zum Beleg anführen wollen, so steht eine Menge von Beispielen ähnlicher Art zu Gebote, die



445—452. Momentaufnahmen von Ottomar Anschütz in Berlin.

445—446. Störche. — 447—448. Graben- und Hochsprung eines Rennpferdes in Karriere. — 449. Pferde auf der Weide. — 450. Hirsche auf der Waldwiese. — 451. Ballspiel. — 452. Kopfsprung.



453—456. Momentaufnahmen von Ottomar Anschütz in Berlin.

453 u. 454. Das Werfen eines Speeres. — 455. Schnelllauf. — 456. Hochsprung.

wir aber nicht erst anzuführen brauchen, da sie dem Leser selbst wohl bekannt sind. Nur einige wollen wir erwähnen, die in sinnreicher Ausführung Faktoren enthalten, durch deren Mitwirkung die überraschende Erscheinung immer ohne weiteres erklärlich ist.

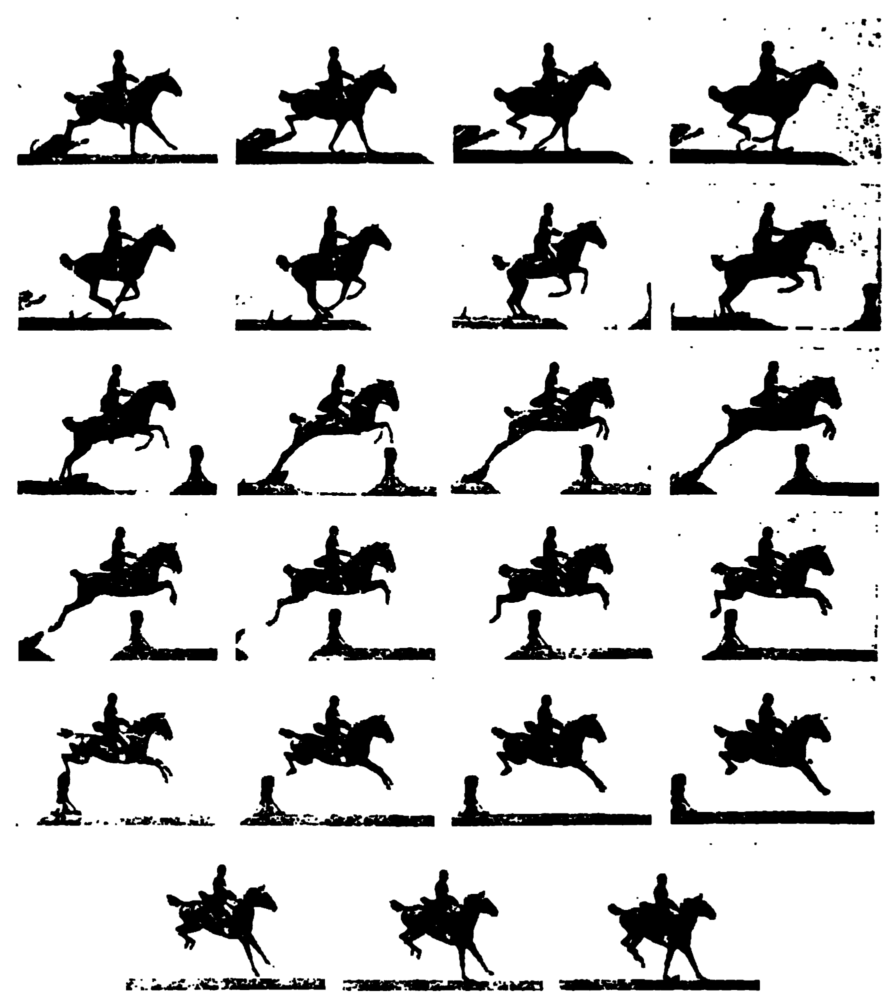
Der Farbenkreisel ist ein ebenso einfacher wie geeigneter Apparat für Versuche über Nachbilder, wie über die Dauer des Lichteindrucks. Er besteht im wesentlichen aus einem massiven, etwa 15—20 cm im Durchmesser haltenden Kreisel, den man durch rasches Abziehen eines um die Spindel gewickelten Bindfadens wie einen gewöhnlichen Brummkreisel in schnelle Umdrehung versetzt (Abb. 440). Auf die obere Fläche des Kreisels kann man während der Drehung runde in der Mitte durchbohrte Pappscheiben aufsetzen. Sind diese sektorenweise mit verschiedenen Farben bemalt, so bringt der rasche Wechsel der in schneller Aufeinanderfolge wiederkehrenden Bilder auf unser Auge den Eindruck einer Mischfarbe hervor. Der Wechsel der einzelnen Farben erfolgt zu rasch auf einander, als daß wir im stande wären, sie gesondert wahrzunehmen. Ist die Scheibe z. B. in abwechselnd gelbe und blaue Ausschnitte geteilt, so erscheint sie während der Drehung grün; sind sie abwechselnd blau und rot, so erhalten wir den Eindruck von Violett u. s. w. Man kann mit einem solchen Kreisel noch andere Versuche anstellen: wählt man z. B. den oberen Teil der Spindel hohl und setzt verschiedenartig gebogene Drahtstücke ein, so bringen dieselben bei ihrer Rotation den Eindruck von runden Hohlkörpern hervor, wie Abb. 441 andeutet. Dadurch, daß man auf einen schief stehenden Draht eine in farbige Abschnitte geteilte Papierscheibe setzt, wie es Abb. 442 zeigt, erhält man bei der Rotation überraschende Farbeneffekte, konzentrische Ringe, die in Farbe und Breite bei jeder Berührung wechseln und reizende Kombinationen darbieten.

Die Abwechselung wird dadurch hervorgerufen, daß die Scheibe lose auf dem Draht sitzt und beim geringsten Anstoß ihre Lage ändert, und zwar infolge der Wirkung der Zentrifugalkraft an den äußersten Punkt des Drahtes getrieben wird. Sind z. B. die durch Schraffierung abgegrenzten drei Felder der Scheibe in Abb. 442 gelb, rot und blau gefärbt, so wird in einer Lage die äußere Region blau erscheinen, um nach innen zu bald in Grün überzugehen; neben dem Grün erscheint mehr nach dem Zentrum zu ein Ring in Orange, der wieder in Rot übergeht. Eine leise Berührung der Scheibe bewirkt, daß anders gefärbte Teile der Scheibe nach außen kommen, und infolgedessen neue Farbenkombinationen entstehen. Der Grund aller dieser Erscheinungen liegt darin, daß eine durch einen Lichteindruck gereizte Stelle der Netzhaut nicht augenblicklich wieder zur Ruhe kommt, wenn die Ursache des Lichteindruckes selbst aufgehört hat, sondern daß der Lichteindruck bei genügend schneller Umdrehung bis zum nächstfolgenden Bilde bestehen bleibt, und daß deshalb die rasch auf einander folgenden Einzelbilder nicht gesondert wahrgenommen werden, sondern sich zu einem Gesamtbilde vermischen. In Fig. 443 ist ein einfacher Farbenkreisel dargestellt, dessen Farbenscheiben durch ein am Fuße des Apparates befindliches Uhrwerk in gleichmäßige Rotation versetzt werden können.

Die Wunderscheibe und die Wundertrommel. Wer kennt nicht die kleinen Papierscheibchen, die auf beiden Seiten mit verschiedenen Bildern bemalt sind und mittels daran befestigter Fäden in rasche Umdrehung versetzt, auf unser Auge den Eindruck eines einzigen Bildes hervorbringen, das die Bestandteile jener beiden Bilder enthält! Ist auf die eine Seite ein leerer Käfig, auf die andere ein Vogel gemalt, so erscheint bei rascher Drehung der Vogel im Käfig sitzend; zahllose Zusammenstellungen ähnlicher Art sind in den Spielwarenhandlungen zu finden; sie führen den Namen Thaumatrop (in Paris im Jahre 1827 erfunden).

Ein recht interessanter, ebenfalls auf der Dauer des Lichteindrucks beruhender Apparat ist unter dem Namen der Wunderscheibe oder stroboskopischen Scheibe bekannt. Führt man in ähnlicher Art, wie vorhin, auf einer Scheibe Zeichnungen aus, welche die verschiedenen Phasen eines sich bewegenden Körpers darstellen, und läßt in rascher Aufeinanderfolge diese Zeichnungen gesondert in das Auge gelangen, so wird dieses die Bewegung selbst zu sehen meinen, indem es die einzelnen Eindrücke zu einer ununterbrochenen Reihe verbindet, deren Anfang und Ende eine Ortsveränderung des Körpers zeigen, in welche wir denselben nach und nach gelangen sehen. Stampfer in Wien hat

nach diesem Prinzip im Jahre 1832 seine stroboskopischen **Scheiben konstruiert, welche** gleichzeitig und unabhängig von ihm auch von **Plateau** erfunden **und mit dem Namen** Phenakistoskop bezeichnet worden sind; eine ganz **besonders zweckmäßige Ausführung haben** dieselben in der 1866 aus Amerika zu uns **gekommenen Wundertrommel erhalten.** Dieser Apparat ist ein hohler Cylinder von Pappe, **der auf einem Zapfen in einem schweren Fuße ruht und in diesem in rasche Umdrehung versetzt werden kann.** Die Wandung des Cylinders in der oberen Hälfte hat eine **Anzahl Durchbrechungen, durch**



443. **Moment-Reihenaufnahme von Ottomar Anschütz in Berlin.**
Graben- und Hochsprung eines Rennpferdes (23 Phasen).

die man in das Innere sehen kann. Der **untere Teil enthält die Bilder,** die in einer Anzahl verschiedener Zeichnungen die auf einander folgenden Phasen einer Bewegung darstellen, wie z. B. die Bewegung der Füße beim Laufen, das Werfen und Wiederauffangen eines Balles u. s. w. Von diesen Bildern sieht **das Auge stets nur eins, wenn bei der** Drehung der Trommel ein Ausschnitt vorbeipassiert; **der folgende Ausschnitt zeigt ein** anderes u. s. w., und wenn in der Bilderreihe **die Einzelstellungen der Bewegungsart in** der richtigen Reihenfolge wiedergegeben sind, so setzt sich **aus diesen einzelnen Bildern der** überraschende Effekt zusammen, den wir alle mit großem **Vergnügen schon oft beobachtet** haben und immer wieder gern beobachten. Abb. 444 **stellt eine solche Wundertrommel**

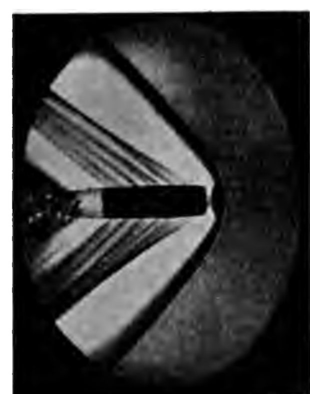
(auch Zootrop oder Dädaleum genannt) dar. Die Bilder werden auf lange Papierstreifen gezeichnet, die man in den unteren Teil des Hohlcylinders hineinlegt, gegen dessen Wand sie bei der Rotation durch die Zentrifugalkraft angedrückt werden. Man betrachtet sie durch eine der Seitenöffnungen und gewinnt den Eindruck eines in Bewegung befindlichen Bildes.

Ausgezeichnete Bilder für solche Zwecke sind in der neuesten Zeit von dem Amerikaner Muybridge, sowie in Deutschland von O. Anschütz durch Momentphotographieen hergestellt worden, welche die Bewegungen von Menschen und Tieren in voller Naturtreue zur Anschauung bringen und deshalb für das Studium der tierischen Bewegungen von außerordentlicher Wichtigkeit sind. Die Bilderreihen, welche bei dem Anschützschen





458—460. Flinten- und Kanonenprojektile im Fluge.
Nach Momentphotographieen von E. und L. Mach.


461—463. Flintenprojektile im Fluge.
Nach Momentphotographieen von Dr. L. Mach.

461. Hinten gespitztes Gewehr-Messingprojektil von 420 m Geschwindigkeit pro Sekunde. 462. Abgestumpftes österreichisches Stahlmantelgeschoß von 518 m Geschwindigkeit pro Sekunde. 463. Österreichisches Mannlicher-Gewehrprojektil von 580 m Geschwindigkeit pro Sekunde.

Schnellseher zur Verwendung kommen, sind derart hergestellt, daß der betreffende Gegenstand, während er sich vor der photographischen Camera vorbeibewegt, innerhalb eines Zeitintervalls von 0,5—1,5 Sekunde 15—24mal aufgenommen wird.

Abb. 445—452 zeigen verschiedene, mit dem Anschützschen Momentapparat aufgenommene Augenblicksbilder, während die Bilderreihe (Abb. 453—457) die unmittelbar auf einander folgenden Momente einer Bewegungsart darstellt.

Abb. 458—463 stellen Momentaufnahmen von Flinten- und Kanonenprojektilen im Fluge dar, welche von E. und L. Mach (aus Prag) auf dem Kruppschen Schießplatze in Meppen ausgeführt worden sind, und zwar stellt Abb. 458 ein rückwärts gespitztes Gewehrprojektil von 520 m Geschwindigkeit pro Sekunde samt den vom Geschoß erzeugten Luftwellen und Wirbeln dar, während Abb. 459 u. 460 einem doppelt spitzen, bezw.

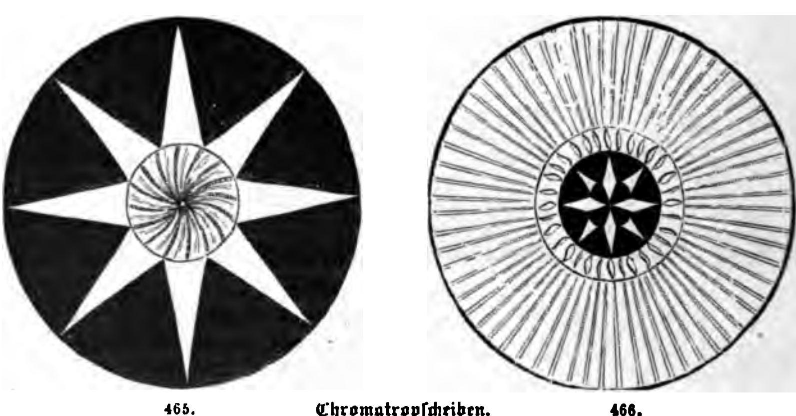
doppelt stumpfen Kanonenprojektil von 4 cm Kaliber und 670 m Geschwindigkeit pro Sekunde entsprechen. Zur Beleuchtung wird ein möglichst heller, aber möglichst kurze Zeit (Millionstel Sekunde) andauernder, elektrischer Funken benutzt, der genau in dem Augenblick überspringt, in welchem das herbeieilende Geschoß zwei vertikal ausgespannte Drähte eines unterbrochenen Stromkreises berührt. Man sieht in den Abbildungen deutlich die beiden vertikalen Linien, welche die Auslösungsdrähte des Beleuchtungsfunkens sind. Beim Durchgang des Geschosses durch dieselben wird der Stromkreis auf einen Moment geschlossen und dadurch die Batterieentladung bewirkt. Man erkennt ferner deutlich die hyperboloidförmige Kopfluftwelle, welche das Geschoß vor sich hertreibt. Unmittelbar hinter dem Geschoß entsteht ein luftleerer Raum, in welchen die Luft in spiraligem Wirbel nachschießt, vergleichbar dem nachströmenden Kielwasser eines schnell fahrenden Schiffes.



464. Elektrischer Schnellseher von Ottomar Anschütz.

In Abb. 464 ist der elektrische Schnellseher von O. Anschütz dargestellt, bei dem die auf einer Scheibe angeordneten Bilder (Diapositive) an einer Geißlerschen Röhre vorbeigeführt werden, welche beim Vorübergleiten eines jeden Bildes kurz aufleuchtet. Er ist der eigentliche Vorläufer der in neuester Zeit viel genannten und viel bewunderten Kinetoskope und Kinematographen, von denen der Edisonsche auf der Berliner Gewerbeausstellung im Jahre 1896 mit Recht einen der fesselndsten und beliebtesten Anziehungspunkte gebildet hat.

Das Chromatrop. Noch einen anderen interessanten, gleichfalls auf der Dauer des Lichteindruckes beruhenden, optischen Apparat wollen wir erwähnen, dessen blendende Effekte den unvorbereiteten Zuschauer aufs höchste zu überraschen pflegen. Es ist dies das bekannte Chromatrop oder Linien- und Farbenspiel, das gelegentlich der Darstellung



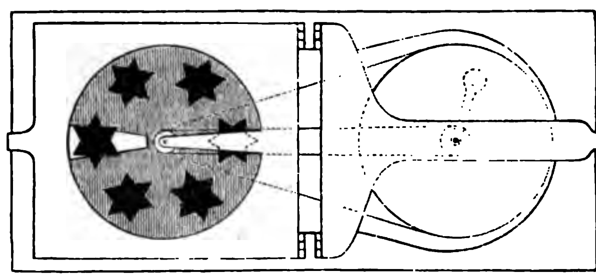
465. Chromatropscheiben. 466.

von Nebelbildern die meisten unserer Leser wohl gesehen haben. Auf einem durchscheinenden Schirme sehen wir plötzlich ein kreisförmiges System bunter, leuchtender Linien, guillochenartig in einander verstrickt; in den verschiedensten hellen und bunten Farben abwechselnd verstärkt sich der Eindruck durch den eigentümlichen Kontrast. Strahlenförmig schießen die Linien aus dem Mittelpunkte hervor bis an die Peripherie des erleuchteten Feldes, wo sie ebenso geheimnisvoll verschwinden, wie sie sich geheimnisvoll von der Mitte aus in unerschöpflicher Menge wieder erzeugen. Und wenn wir hinter den Schirm treten und uns den Apparat erklären lassen, überrascht uns die außerordentliche Einfachheit der Mittel, mit welchen diese reizenden Effekte hervorgebracht werden.

Wir sehen nichts als eine Laterna magica, bei der die schieberförmig einzusetzenden Glasgemälde durch runde, drehbare Glasscheiben ersetzt sind, die ähnlich wie in Abb. 465 und 466 mit Zeichnungen versehen und bunt bemalt sind.

Zwei solcher Scheiben sind vor einander, so daß sie sich decken, wenn man hindurchsieht, auf einem mit einem kreisförmigen Ausschnitt versehenen Brettchen angebracht und werden durch kleine Friktionsröllchen an ihrer Stelle festgehalten. Durch eine Kurbel mit zwei Laufschnuren werden sie gedreht, und da von den beiden Laufschnuren die eine gekreuzt ist, die andere nicht, so laufen die Scheiben in entgegengesetzter Richtung um. Dadurch, daß die durchsichtigen Scheiben auf diese Weise in ganz verschiedene Lagen zu einander kommen, entstehen die mannigfachen Kombinationen, die mit den Bildern des Kaleidoskops eine gewisse Ähnlichkeit, durch ihren allmählichen Übergang in einander aber einen großen Reiz vor diesen voraus haben. Die Laterna magica dient nur dazu, das Bild zu vergrößern und mit möglichster Helligkeit auf einer geeigneten Fläche sichtbar zu machen. Abb. 467 zeigt eine einfachere Vorrichtung für diesen Zweck.

Subjektive Gesichtserscheinungen.



467. Projektionsstroboskop.

Ein Reiz der Netzhaut braucht nicht notwendig von Lichtstrahlen auszugehen. Jeder Eindruck auf die Sehnerven äußert sich in einer Lichtvorstellung, welcher in der Außenwelt eine Lichtquelle nicht zu entsprechen braucht. Man spricht von spezifischer Energie der Sinne. Wie ein Reiz auf den Gehörnerv stets die Vorstellung von einem Schalle wachruft, so bewirkt ein Reiz auf den Sehnerv eine Gesichtsvorstellung. Lichtblitze verschiedener Art werden im Auge nicht nur durch Druck, sondern auch durch den elektrischen Strom, durch Wärmeeinflüsse und dergleichen hervorgerufen, wie jeder leicht erfahren kann, wenn er bei geschlossenen Augen durch dieselben den Sehnerv reizt. Man nennt diese Erscheinungen **subjektive Gesichtserscheinungen.**

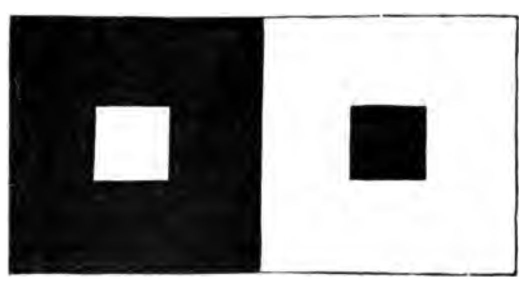
Es bedarf wohl keiner besonderen Hervorhebung, daß bei ihnen von wirklichem Licht nicht die Rede sein kann, und daß jene Erzählung, der zufolge ein in stockfinsterer Nacht von einem Räuber Angefallener seinen Angreifer deutlich erkannt habe, weil ihm dieser einen solchen Schlag ins Gesicht gegeben habe, daß ihm das Feuer aus den Augen gesprungen sei, in das Reich der Fabel gehört. Und doch werden dergleichen Erzählungen häufig geglaubt, weil im Volke über die gewöhnlichsten natürlichen Vorgänge noch zu wenig klare Vorstellungen verbreitet sind. Tauchte doch vor einiger Zeit in den Zeitungen die wunderbare Neuigkeit auf, daß sich auf der Netzhaut von Menschen, welche mit offenem Auge eines gewaltsamen Todes gestorben wären, die letztaufgenommenen Bilder fixierten, und daß auf diese Weise z. B. die Gesichtszüge eines Mörders im Auge des Ermordeten förmlich photographiert, deutlich erkannt worden wären. Solche Erzählungen gehören in das Reich derjenigen von Münchhausen, welcher, als er seinen Flintenstein verloren hatte, sich bekanntlich einen Schlag ins Auge versetzt und das aus demselben springende Feuer benutzt, um sein Gewehr dadurch zum Losgehen zu bringen.

Zu den subjektiven Gesichtserscheinungen kann man wohl auch, weil sie ebenfalls auf der eigentümlichen Erregungsweise des Sehnerven beruhen, die sogenannten **optischen Täuschungen** rechnen, welche nicht nur in physiologischer Hinsicht äußerst interessant, sondern auch praktisch für die Kunst, besonders die Malerei von Wichtigkeit sind. Es sind dies die Erscheinungen der **Irradiation**, die **Kontrasterscheinungen** und die Farbenerscheinungen der **Nachbilder.**

Schneiden wir zwei gleichgroße, runde oder quadratische Stücke aus Papier, das eine von schwarzer, das andere von weißer Farbe, und legen wir das schwarze auf einen

weißen Bogen, umgekehrt aber das weiße auf einen schwarzen, so erscheinen sie von ungleicher Größe, und zwar erscheint das weiße größer als das schwarze (Abb. 468). Allgemein erscheinen stark beleuchtete Flächen stets größer, als sie in Wirklichkeit sind, während die benachbarten dunklen Flächen um ebensoviel kleiner erscheinen. Das helle Licht zieht auf unserer Netzhaut nicht nur die direkt getroffenen, sondern auch deren benachbarte Stellen in den Kreis der Erregung; es findet nach Plateau eine Ausbreitung des Lichtreizes auf der Netzhaut statt, während Helmholtz die Erklärung der Irradiationserscheinungen auf das Auftreten von Zerstreuungskreisen auf der Netzhaut, auch bei nicht vollkommener Akkomodation infolge chromatischer und monochromatischer Abweichung zurückführt; das Feld der empfindenden Netzhaut wird größer, als der Größe des Bildes entspricht. Eine Bildsäule sieht kleiner aus, wenn sie aus Bronze gegossen ist, als wenn Gips oder weißer Marmor zu ihrer Herstellung verwendet werden. Schwarze Handschuhe machen die Hände zierlicher als weiße, und wenn eine Spitzenklöpplerin ihre Kunst zeigen will, wird sie besser thun, schwarze Fäden zu verwenden und das Gewebe auf einer weißen Unterlage auszubreiten, als umgekehrt.

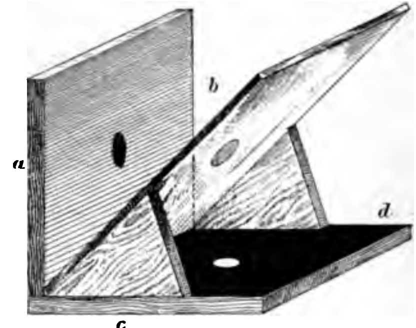
Haben wir die weiße quadratische oder runde Scheibe auf dem schwarzen Bogen eine Zeitlang scharf fixiert und sehen dann von ihr weg auf eine weiße Fläche, so behalten wir eine gewisse Zeit lang noch das frühere Bild im Auge, aber merkwürdigerweise jetzt als einen dunklen, runden, resp. quadratischen Fleck. Es ist ein Nachbild entstanden durch ungleiche Reizung und dadurch erfolgte zeitweilige Ermüdung, Abstumpfung der Netzhautpartie. Nach einiger Zeit verschwindet das Nachbild, die Nervenendigungen sind an allen Punkten der Netzhaut wieder gleich empfänglich. Wie nun hier durch das Weiß die Nerven abgestumpft werden, so üben auch die einzelnen Farben eine analoge merkbare Wirkung auf den Sehnerven aus, deren Beachtung nicht minder wichtig ist für den Maler, wie für den Färber, den Kattunfabrikanten, den Lackierer, den Tapezierer, kurz in allen Künsten und Gewerben, bei deren Erzeugnissen es darauf ankommt, die Erscheinungen der Kontrastwirkungen zur Erzielung schöner Farbennüancen nutzbar zu machen. Nimmt man statt eines schwarzen ein rotes Stück Papier und betrachtet es auf einer weißen Fläche, so sieht man nach Entfernung desselben ebenfalls ein Nachbild, welches in diesem Falle aber grün gefärbt ist; umgekehrt erzeugt Grün ein rotes Nachbild, ferner Gelb ein violettes und Violett ein gelbes Nachbild. Die Nerven der Netzhaut werden durch längere Einwirkung einer bestimmten Farbe abgestumpft für diese Farbe und empfinden dann im weißen Lichte vorzugsweise diejenigen Strahlen, welche nach Abzug jener vom Weiß übrig bleiben, d. i. die Komplementärfarbe.


468. Zum Nachweis der Irradiation.

Es ist bekannt, daß, wenn man mehrere Nüancen derselben Farbe nach einander betrachtet, die folgenden anscheinend immer mehr an Schönheit verlieren, daß dagegen die betreffende Komplementärfarbe gewinnt, wenn das Auge sich vorher an einer Farbe satt gesehen hat. Eine Zusammenstellung von komplementären Farben macht auf das Auge stets einen angenehmen Eindruck. Deswegen suchen auch Zeughändler, um das Aussehen ihrer Stoffe nicht zu schädigen, einer solchen Ermüdung der Augen dadurch vorzubeugen, daß sie jene immer mit entsprechender Abwechselung der Farben in ihren Schaufenstern neben einander legen. Keine Farbe ist an und für sich häßlich, denn jede kann, in der entsprechenden Weise mit anderen zusammengestellt, einen angenehmen Eindruck machen, und die gute Wirkung läßt sich unter Berücksichtigung der Reize, welche die Kontraste der Helligkeit und Farbe hervorrufen, voraus berechnen.

Mit Hilfe des folgenden, aus dünnem Holze leicht herzustellenden Apparats lassen sich die Kontrastfarben schön zeigen. Die vertikale, mit weißem Papier überzogene Wand hat

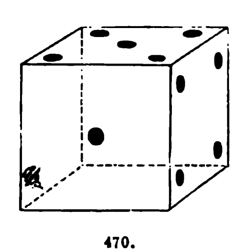
in der Mitte einen schwarzen kreisrunden Fleck von etwa 1,5 cm Durchmesser, während die horizontale, mit schwarzem Papier überzogene Platte in ihrer Mitte einen gleich großen weißen Fleck hat. Unter einem Winkel von 45° gegen beide Wände geneigt befindet sich eine farbige Glasplatte. Hält man nun das Auge so, daß das von der unteren Fläche der Glasplatte reflektierte Spiegelbild des weißen Flecks gerade vor dem schwarzen Fleck der vertikalen Wand gesehen wird, so erscheint das Spiegelbild in einer zur Farbe der Glasplatte komplementären Farbe.



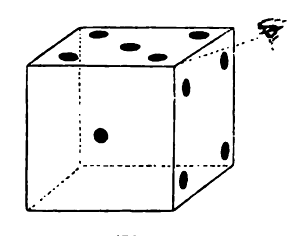
469.
Apparat zur Beobachtung der Kontrastfarben.

Sehen mit zwei Augen. Alle bisher betrachteten Erscheinungen würden wir in der angegebenen Weise auch noch wahrnehmen können, wenn wir, statt mit zweien, nur mit einem einzigen Auge, wie die Cyklopen, begabt wären. Anders aber ist es mit gewissen Eindrücken, welche uns die Vorstellung von der Körperlichkeit der Gegenstände oder von der Tiefenwahrnehmung verschaffen, und die wir gerade dadurch empfangen, daß wir gleichzeitig mit zwei Augen (binokular) sehen. Weil es zur Kenntnis der Gesichtsempfindungen überhaupt notwendig ist, besonders aber auch, weil sich auf die Kenntnis der Vorgänge die geistreiche Erfindung eines allgemein verbreiteten, reizenden Apparates gründet, wollen wir diesem interessanten Gegenstande einige Aufmerksamkeit schenken.

Betrachten wir irgend ein Objekt, so entsteht auf der Netzhaut unseres Auges ein flächenhaftes Bild desselben. Es ist natürlich, daß dasselbe genau so, wie es durch ein wirkliches Gebäude, einen Baum u. s. w. hervorgerufen wird, auch durch eine Abbildung dieser körperlichen Gegenstände erzeugt werden könnte. Nur müßte die Abbildung alle Verhältnisse der Perspektive, Färbung und Beleuchtung richtig wiedergeben. Mit einem Auge vermögen wir nur zwei Dimensionen, Breite und Höhe zu unterscheiden. Um also mit einem Auge einen Körper wirklich als körperlich erkennen zu können, müssen wir das Auge in verschiedene Lagen zu demselben bringen und nach und nach von verschiedenen Seiten uns Bilder des Körpers verschaffen. Erst auf diese Weise gelangen wir beim Sehen mit einem Auge durch die Erfahrung zur Vorstellung von der dritten Dimension, zur Vorstellung des Körperlichen. Betrachtet das Auge z. B. den in Abb. 470 u. 471 dargestellten Würfel das eine Mal gerade von vorn, so sieht es nur die quadratische Fläche 1, dagegen, wenn es die Stellung von Abb. 471 einnimmt, zwei andere Flächen 4 und 5. Aus der Kombination dieser zweiten Ansicht mit der ersten ergibt sich für uns, daß der Gegenstand nicht nur nach der Fläche 1, sondern noch nach einer anderen, das erste Mal nicht sichtbaren Richtung ausgedehnt ist. Wir werden auf die dritte Dimension, die Tiefe, hingewiesen und konstruieren uns in dieser die in der ersten Stellung nicht sichtbaren Flächen nach Analogie hinzu.



470.
Würfel von vorn betrachtet.



471.
Würfel von der Seite betrachtet.

Durch die Erfahrung und mit Hilfe von Analogieschlüssen vermögen wir also aus wenig Elementen uns vollständige Bilder der Gegenstände zusammenzustellen. Wir würden also nötigenfalls auch mit **einem** Auge die Außenwelt körperlich auffassen lernen; dieser Zustand wäre jedoch sehr mangelhaft gegen die bestehende Einrichtung unseres Sehorgans, welche uns in dem gleichzeitigen Gebrauch zweier Augen die Möglichkeit gibt, auf einmal auszuführen, was mit einem Auge nur nach einander geschehen könnte.

Unsere beiden Augen geben uns zwei Bilder zu gleicher Zeit, welche aber etwas von einander verschieden sind, da wir mit dem einen Auge etwas mehr von der einen, mit dem anderen Auge etwas mehr von der anderen Seite des Gegenstandes sehen. Durch die Kombination dieser beiden Bilder zu einem Bild wird eben die Anschauung des Körperlichen hervorgerufen.

Das Stereoskop. Auf dieser Erscheinung beruht die Einrichtung des Stereoskops. Dies ist ein Apparat, vermöge dessen wir durch gleichzeitiges Sehen mit beiden Augen die körperliche Anschauung eines Objektes gewinnen können aus zwei Zeichnungen, von denen die eine das Objekt so darstellt, wie es von dem einen Auge, die andere so, wie es von dem anderen Auge gesehen würde. Das Prinzip des Stereoskops scheint schon sehr früh erkannt worden zu sein. Nach Brewster soll es schon Euklid gekannt und Galenus vor 1500 Jahren erläutert haben. Baptista Porta soll im Jahre 1599 richtige stereoskopische Zeichnungen ausgeführt und zwischen sie das entsprechende, perspektivisch gezeichnete Bild gestellt haben, worin nicht nur das Prinzip des Stereoskops, sondern sogar die Hauptsache seiner Ausführung enthalten sein würde. Auch den berühmten Malern, welche sich, früher häufig mehr als jetzt, mit den wissenschaftlichen Grundlagen ihrer Kunst beschäftigten, waren, wie es scheint, die Grundgesetze des Körperlichsehens ebenfalls schon lange bekannt; von Jacopo da Empoli (geboren 1554, gestorben 1640) sollen ebenfalls stereoskopische Zeichnungen ausgeführt worden sein, welche im Musée Wicar in Lille aufbewahrt werden. Je zwei von ihnen stellen denselben Gegenstand von zwei wenig verschiedenen Gesichtspunkten aus gesehen dar. Freilich aber kann dies auch ganz zufällig oder vielleicht deshalb geschehen sein, weil, wie Helmholtz meint, der Maler mit seiner ersten Arbeit nicht zufrieden, von einem etwas veränderten Gesichtspunkte aus eine zweite Zeichnung entwarf.

Wie dem nun auch sei, ob sichere Versuche und Erfahrungen auf diesem Gebiete schon lange vorliegen, oder ob sie wieder in Vergessenheit geraten sind, so viel scheint festzustehen, daß Wheatstone seine schöne Entdeckung des Stereoskops ganz selbständig gemacht hat. Er entwarf zwei Zeichnungen desselben Körpers genau so, wie dessen Bilder auf der Netzhaut der beiden Augen sich darstellen müßten, und erfand, um diese zwei Bilder bequem beiden Augen gleichzeitig zur Anschauung zu bringen, diejenige Vorrichtung, welche jetzt unter dem Namen stereoskopischer Apparat allgemein bekannt ist, und deren Einrichtung wir gleich näher betrachten wollen, nachdem wir des besseren Verständnisses wegen einige Vorbemerkungen vorausgeschickt.

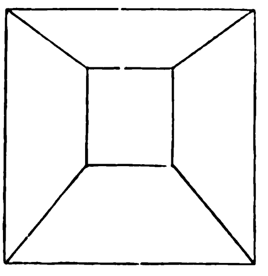
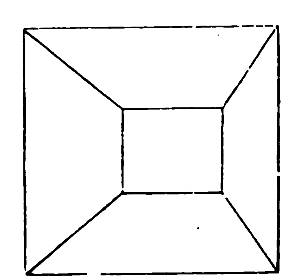
d b c a

472.

Die beiden Augen nehmen alle Lichtstrahlen auf, welche unter nicht zu großem Winkel mit der Sehachse einfallen; damit dieselben aber von uns zu einem Bilde vereinigt werden, müssen sie nach der nativistischen Theorie des Sehens auf identische Stellen der Netzhaut fallen; dieses findet aber nur für diejenigen Strahlen statt, welche von dem Kreuzungspunkte der Sehachsen ausgehen. Die Sehnerven bilden nämlich einen Faserstrang, welcher sich in zwei gleiche, auf der Netzhaut endigende Äste teilt. Die hier symmetrisch angeordneten Faserenden gehören in dem rechten und linken Auge paarweise zusammen. Werden diese symmetrischen Netzhautstellen in beiden Augen in gleicher Weise erregt, so gewinnen wir aus beiden Bildern die Vorstellung von nur einem Bilde. Dagegen erblicken wir die Bilder getrennt, wenn die Eindrücke nicht von identischen Punkten der Netzhaut aufgenommen worden sind. Unser Körperlichsehen besteht also darin, daß wir unsere Augen so einstellen und richten, daß die von einem Punkte kommenden Strahlen in beiden Augen jene einander entsprechenden Stellen der Netzhaut treffen. Dies ist streng genommen immer nur für einen einzigen Punkt möglich, alle anderen Punkte sehen wir doppelt; nur achten wir gewöhnlich nicht darauf, da sich die Bilder ziemlich decken, und die Undeutlichkeit verschwindet, sobald wir mit Aufmerksamkeit die doppelten Konturen ins Auge fassen.

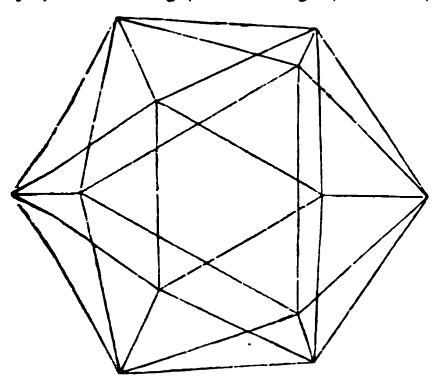
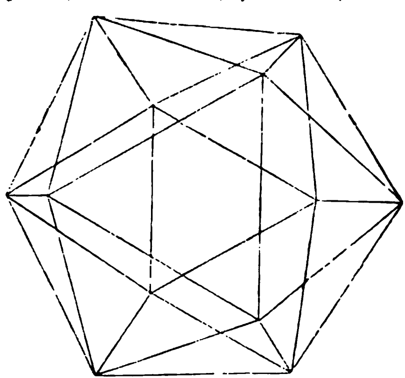
Wenn wir in gerader Linie hinter einander zwei brennende Kerzen aufstellen und bald die eine, bald die andere mit unseren Augen fixieren, so bemerken wir, daß wir nur

von derjenigen Flamme, auf welche wir gerade unsere Augen richten, die sich also im Kreuzungspunkte der Sehachsen befindet, ein einziges Bild erhalten, daß dagegen die andere Flamme immer zwei Bilder hervorruft. Stellt man nun neben die eine der beiden Kerzen, gleichviel ob neben die nähere oder neben die entferntere, eine dritte, so daß alle drei mit den Augen in gleicher Horizontalebene liegen, so erhält man, wenn man die einzeln stehende fixiert, von den beiden anderen je zwei Bilder. Die beiden mittelsten können zur Deckung gebracht werden auf zweierlei Weise, indem man entweder die fixierte, einzelne Kerze so stellt, daß die verlängerten Sehachsen die beiden anderen Kerzen treffen, oder so, daß man jene beiden Kerzen in die Richtung der Sehachsen vor deren Kreuzungspunkt aufstellt.

473. Stereoskopische Bilder einer Pyramide.

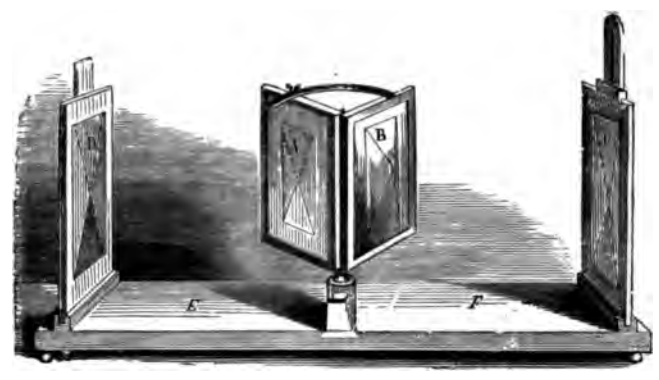
Anstatt der beiden Kerzen können wir stereoskopisch gezeichnete Bilder vor die Augen bringen, und der Nutzen dieser Augenübung wird uns auf frappante Weise bemerkbar werden. Abb. 472 stellt den Fall dar, daß die Augen a so gerichtet sind, daß sich die Sehachsen in b kreuzen, oder daß der Punkt b von beiden Augen fixiert wird. Wird diese Augenrichtung festgehalten, so müssen zwei stereoskopisch gezeichnete Ansichten auf identische Netzhautstellen fallen und zur Deckung kommen, sowohl wenn sie bei c in die Sehrichtung gebracht, als auch wenn sie in d aufgestellt werden. In jedem der beiden Fälle vereinigen sich die beiden Bilder in unserer Vorstellung zu einem einzigen, wir sehen den dargestellten Gegenstand körperlich, und zwar so, als ob er sich in b befände.

474. Stereoskopische Bilder eines Krystallmodells.

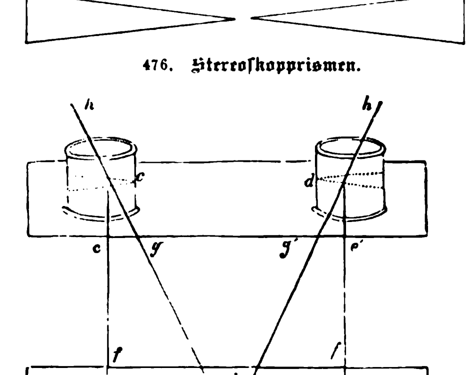
Der Effekt ist aber in beiden Fällen ein verschiedener, denn wenn wir z. B. die beiden, von einer und derselben Pyramide genommenen Ansichten (Abb. 473) in c aufstellen, so nimmt das linke Auge das links liegende, das rechte Auge das rechts liegende Bild auf, und da dieselben genau den Ansichten entsprechen, welche wir in Wirklichkeit von einer mit der Spitze unseren Augen zugerichteten Pyramide haben würden, so rufen sie auch bei dieser Art der Betrachtung den Eindruck einer erhabenen Pyramide hervor. Wenn wir dagegen in eine hohle, mit der Basis uns zugekehrte Pyramide hineinschauen, so erhält das linke Auge eine Ansicht, wie sie das rechts gezeichnete Bild darstellt, und das rechte Auge eine, wie sie das linke Bild zeigt. Daher scheint auch, wenn wir die Sehachsen vor den in d aufgestellten Bildern sich kreuzen lassen, das vereinigte Bild einer vertieften und mit der Spitze uns abgewandten Pyramide anzugehören. Bemerkenswert ist dabei die Täuschung bezüglich der scheinbaren Tiefe. Dieselbe erscheint in dem zuletzt betrachteten Falle viel bedeutender als vorher.

Auf diese Weise kann man nach demselben Prinzip entworfene Zeichnungen von Körpern durch geeignete Betrachtung nach Belieben zu einem erhabenen oder vertieften Bilde vereinigen. Abb. 474 gibt ein anderes Beispiel, dessen Betrachtung für jeden, der sich die Mühe der ungewohnten Augeneinstellung nicht verdrießen läßt, höchst lehr- und genußreich werden wird. Als ein bequemes Hilfsmittel, die Augen in der erforderlichen Weise zu richten, kann übrigens eine Stricknadel dienen, die man in den durch Probieren leicht zu findenden Kreuzungspunkt der Sehachsen hält; man bewegt sie, indem man sie scharf fixiert, langsam auf die Zeichnung oder die Augen zu, bis die mittelsten der vier Bilder eben zur Deckung gelangen. Die Sehachsen erst hinter der Zeichnung sich kreuzen zu lassen, also die Bilder bei ihrer Aufstellung in c (Abb. 472) zu vereinigen, ist schwieriger; in diesem Falle muß man bei gewöhnlichen stereoskopischen Bildern die Augen so richten, als wollte man durch die in richtiger Sehweite gehaltene Zeichnung hindurch einen 7—8 m entfernten Gegenstand ins Auge fassen.



475. Wheatstonesches Spiegelstereoskop.

In dem schon erwähnten, von Wheatstone erfundenen stereoskopischen Apparate sind alle die Schwierigkeiten, welche ein derartiges gezwungenes Sehen darbietet, umgangen, und der überraschende Effekt zeigt sich jedem, der sich der Gründe auch nicht bewußt ist. Die Erfindung Wheatstones ist am 21. Juni 1838 der Royal Society zu London vorgelegt worden. Der Apparat (Abb. 475) besteht aus zwei ebenen Spiegeln A und B, von etwa 22 qcm Oberfläche, welche unter einander einen Winkel von 90° bilden.



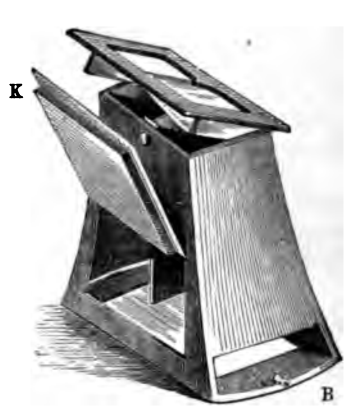
476. Stereoskopprismen.

477. Prinzip des stereoskopischen Apparats.

Unmittelbar vor denselben (in der Zeichnung nicht angegeben) befindet sich ein kleines Brettchen mit zwei Öffnungen für die Augen. Zu beiden Seiten sind zwei vertikale Stative zur Aufnahme der beiden Schieber C und D angebracht. Auf diesen Schiebern werden die stereoskopischen Zeichnungen befestigt; ihre Bilder erscheinen in den Spiegeln und werden in diesen von den Augen betrachtet. Da jedes Auge wegen seiner nahen Stellung zu den Spiegeln immer nur ein einziges Bild sieht, so wird es nicht leicht beirrt; außerdem aber erlaubt diese Vorrichtung, viel größere Bilder zu betrachten als mit freien Augen.

Wheatstone selbst ersetzte seinen Apparat bald durch ein anderes Instrument, welches wegen seiner bequemeren Handhabung große Vorzüge vor jenem hat. Statt der Spiegel wandte er nämlich Prismen an, die mit ihren brechenden Kanten einander zugekehrt waren (Abb. 476). Abb. 477 versinnlicht dies Arrangement und seine Wirkungsweise. Von den Bildern a und b gehen die Strahlen f in die Prismen c und d, werden durch dieselben in der Richtung nach h gebrochen und gelangen so in die Augen, welche die Bilder als ein einziges in der Richtung h i erblicken. Die gebräuchlichste äußere Form dieses Prismenstereoskops zeigt Abb. 478.

So zweckentsprechend dieser Apparat auch war, so litt seine Herstellung doch an der großen Schwierigkeit, zwei völlig gleiche Prismen, wie sie hierzu nötig sind, herzustellen. Aber auch dieser Übelstand wurde bald gehoben durch den schottischen Physiker Brewster, welcher die geniale Idee hatte, eine gewöhnliche Linse mitten aus einander zu schneiden und die beiden völlig symmetrischen Hälften an Stelle der Prismen einzusetzen. Er erhielt durch die sphärische Krümmung seiner Gläser noch eine vorteilhafte Vergrößerung der Bilder, welche zur Erhöhung der Täuschung wesentlich beiträgt. Trotz dieser Vervollkommnung vergingen indessen noch viele Jahre, ehe die allgemeine Aufmerksamkeit dem Stereoskop zugelenkt wurde, und wenn nicht der lebhafte französische Sinn Gefallen an den reizenden Erscheinungen gefunden hätte, so wäre wohl sicher die Einführung des Stereoskops für das große Publikum noch lange verzögert worden.



478. Wheatstonesches Prismenstereoskop.

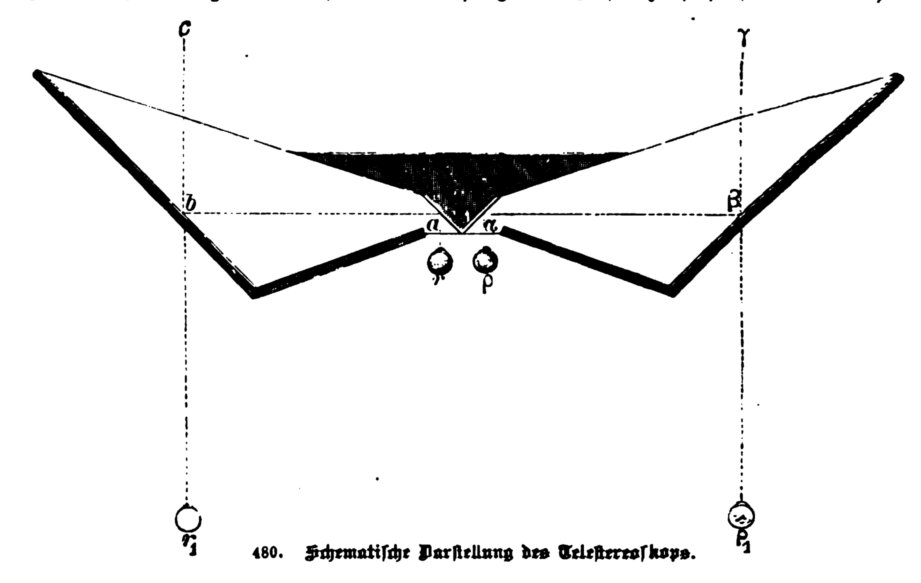
Brewster kam im Herbst 1850 nach Paris und zeigte seinen Apparat den dortigen Naturforschern. In Deutschland hatte schon 1844 Professor Moser photographische Bilder für das Stereoskop angefertigt; sein Bericht darüber war in Doves „Repertorium der Physik“ abgedruckt, aber niemand dachte bei uns daran, aus diesem Berichte allgemeinen Nutzen zu ziehen. Es genügte wieder einmal, die Sache gedruckt und registriert zu wissen. In Paris ging es rascher. Der als Physiker und Mathematiker bekannte Abbé Moigno erkannte augenblicklich, welch günstige Aufnahme das Stereoskop im Publikum finden müsse. Er bestimmte Brewster, dem ausgezeichneten Optiker Duboscq die Herstellung von Stereoskopen zu übertragen, und aus dessen berühmtem Etablissement verbreiteten sich nun in kurzer Zeit die überall mit Entzücken aufgenommenen Apparate über alle Länder. Nunmehr wurden sie überall hergestellt. Ausstellungen stereoskopischer Bilder durchwanderten Messen und Jahrmärkte, und jetzt findet sich das Stereoskop als eines der beliebtesten Unterhaltungsmittel fast in jeder Familie. Die Linsenhälften hat man der bequemeren Faßbarkeit wegen rund geschliffen und in verschiebbaren Hülsen befestigt, welche ein Einstellen in die für jedes Auge passende Brennweite gestatten. Dadurch bekommt der Apparat Ähnlichkeit mit einem gewöhnlichen Operngucker, der unten in einem viereckigen Kästchen endigt (Abb. 478). An der oberen Wand dieses Kästchens befindet sich eine Klappe K, um Licht einfallen zu lassen, wenn undurchsichtige Bilder betrachtet werden sollen; die Innenfläche ist geschwärzt, um Reflexe zu vermeiden. Der Boden B ist durchbrochen, um auch durchscheinende Bilder bei geschlossener Klappe gegen das Licht betrachten zu können. Außerdem aber hat man auch einfachere Apparate, die nur aus einem Linsenpaare bestehen, Rollapparate zum Zusammenklappen u. s. w., von denen wir nur die in Abb. 479 dargestellte, bequeme Einrichtung vorführen. Brewster hat noch die Linsen verdoppelt, so daß jedes Bild durch zwei Linsen betrachtet wird, um eine stärkere Vergrößerung bei geringerem Umfang zu erzielen.


479. Stereoskopischer Apparat zum Zusammenklappen.

In den Händen der Franzosen wurde vor allen Dingen die Photographie zur Hervorbringung stereoskopischer Abbildungen herangezogen; in der That würde ohne

Anwendung dieser Schwesterkunst die Wheatstonesche Erfindung sich nur auf die einfachsten geometrischen Darstellungen haben beschränken müssen. Die Camera obscura zeichnet von den kompliziertesten Gegenständen mit absoluter Genauigkeit die geringsten, durch die verschiedenen Gesichtspunkte bedingten Abweichungen, die photographische Platte fixiert die Bilder mit ihren unendlich feinen Abstufungen von Licht und Schatten, wie sie der augenblicklichen Beleuchtung entsprechen; bei der Darstellung körperlicher Gegenstände ist nicht nur die Schärfe der Konturen, sondern auch die Verteilung von Licht und Schatten von wesentlicher Bedeutung. Glanz und Beschattung hängen aber von dem Beobachtungsorte ab, und die genaueste Berücksichtigung dieser Momente ist notwendige Bedingung für einen günstigen Effekt. Vorzüglich lehren die Landschaftsbilder, in welch hervorragender Weise solche unscheinbaren Verschiedenheiten zu dem Effekte beitragen.

Wir sehen ein Terrain ansteigen und sich in meilenweiter Ferne verlieren, weit in die Luft hinein locken die Gipfel hoher Berge unseren Blick, wir können ihn versenken in Schluchten, die eine fast unergründliche Tiefe verraten. Vor uns thut sich ein schroffer Abgrund auf. Wir glauben auf einem überhängenden Felsen zu stehen, über den hinweg



480. Schematische Darstellung des Telestereoskops.

die Zweige einer uns beschattenden Kiefer hängen, deren Äste wir greifbar vor unseren Augen wähnen. Noch überraschender fast sind die Ansichten, welche uns in das Innere von Gebäuden, in hohe Dome, lange Zimmerreihen oder weite, mit mancherlei Gegenständen angefüllte Räume führen. Jede Kannelierung der Säulen tritt uns hier plastisch entgegen, das Schnitzwerk wächst aus dem Getäfel heraus, und die eigentümlichen Glanzeffekte, die dadurch hervorgerufen werden, daß jedes Auge verschiedene Stellen der Körper vom hellsten Lichte widerstrahlen sieht, lassen das Material genau unterscheiden. Ein Museum von Skulpturarbeiten gibt unseren Blicken in jeder Entfernung Anhaltspunkte. Die Figuren stehen selbständig da, sie treten auf uns zu, nicht wie Bilder auf einer gemeinsamen Papierfläche; wirkliche, sichtbare Luft, in der die Sonnenstäubchen flimmern, umgibt sie von allen Seiten. Hier sehen wir eine antike Marmorbildsäule, an der wir die Spuren der Verwitterung mit den Fingern untersuchen möchten; dort steht eine Bronzefigur, deren glatte Oberfläche, deren Glanz und Farbe eben nur durch das Auge empfunden und gedeutet werden kann. Und mit eben der Vollkommenheit, mit welcher hier leblose Gegenstände sich darstellen, lassen sich stereoskopische Abbildungen von Personen, Porträts u. s. w. aufnehmen. — Die Empfindlichkeit der photographischen Präparate ist so weit gesteigert worden, daß wir den belebtesten Marktplatz in einem einzigen Moment fixiert, den fliegenden Vogel, das wellenbewegte Meer im Stereoskop sehen können.

So gering nun auch selbst bei einer genauen Untersuchung die Abweichungen der beiden perspektivischen Bilder erscheinen, so sind sie doch — zumal bei Landschaften — größer, als sie der Entfernung unserer Augen entsprechen würden. Die photographischen Apparate werden bei ihrer Aufnahme in größerem Abstande als dem unserer Sehweite von einander aufgestellt. Dadurch macht denn auch das stereoskopische Bild den Eindruck, als ob wir es unter einem um soviel größeren Winkel der Sehachsen betrachteten, als ob ein verkleinertes Modell von uns aus größerer Nähe gesehen würde. So effektvoll aber auch die hinter einander liegenden Partieen auf diese Weise von einander losgelöst werden, so darf doch, wenn der Natürlichkeit nicht Eintrag geschehen soll, eine gewisse Grenze damit nicht überschritten werden. In den Kunsthandlungen findet man stereoskopische Abbildungen des Mondes, dessen Entfernung doch so groß ist, daß ihr gegenüber eine Aufnahme von zwei verschiedenen Standpunkten auf der Erde diejenigen Ansichten nicht geben könnte, welche zur Hervorbringung eines stereoskopischen Effektes erforderlich sind. Außerdem ist der Mond von solchen Dimensionen, daß wir mit unserem Sehapparat ihn nie in seiner körperlichen Totalität auffassen, sondern mit unseren Augen direkt nur verhältnismäßig kleine Teile von ihm erblicken können. Nichtsdestoweniger erscheinen diese Mondstereoskopen vollständig körperlich; der Mond tritt uns als Kugel gegenüber, ja bisweilen ist das Relief so bedeutend, daß er wie ein Ei mit der Spitze uns zugekehrt erscheint. Wie ist dieser Effekt erreicht? Nicht anders als mit Berücksichtigung der eigentümlichen, scheinbaren Schwankung um seine Mittelachse (Libration), die der Mond besitzt, infolge deren er der Erde abwechselnd von seiner einen oder der anderen Seite einige Längengrade mehr von rechts und links zuwendet. Für die Herstellung stereoskopischer Bilder aber bleibt es sich völlig gleich, ob der Aufnahmepunkt verändert wird, oder ob der Gegenstand eine Drehung erfährt, die für den Punkt der Aufnahme jetzt eine veränderte Ansicht gewährt. Und bei dem Monde hat man davon insofern Anwendung gemacht, als man die beiden photographischen Bilder nicht gleichzeitig nahm, sondern das eine, wenn er mehr von seiner linken Seite zeigte, das andere dagegen erst nach Verlauf einiger Zeit, wenn er inzwischen wieder durch seine Mittellage hindurchgegangen war und einen entsprechend größeren Teil seiner rechten Hälfte hervorkehrte. Je weiter die Aufnahmen aus einander liegen, um so größer wird die Verschiedenheit der Bilder, um so hervortretender das Relief ausfallen, das sie im stereoskopischen Apparate zeigen.

Das Telestereoskop. Ein fernes Gebirge vermögen wir, wenn wir es zuerst erblicken, nur schwierig in seine Tiefenverhältnisse aufzulösen. Hier stehen ebenfalls die Augen zu nahe, als daß die beiden Bilder merklich verschiedene Seiten zeigen könnten, und die fernen Bergzüge erscheinen von geringer Plastik, fast nur von einem kulissenartigen Ansehen. Mit Hilfe des von Helmholtz erfundenen Telestereoskops kann man nun die Distanz der Gesichtspunkte beträchtlich erweitern und so von einem sehr entfernten Objekte doch zwei hinreichend verschiedene Bilder erhalten. Die Auflösung der Tiefenverhältnisse wird dadurch, wie bei den photographischen Stereoskopbildern, eine viel entschiedenere.

481. Helmholtzsches Telestereoskop.

Die Einrichtung des Telestereoskops ist sehr einfach und läßt sich an dem Wheatstoneschen Spiegelstereoskop (Abb. 475) beschreiben. Der Apparat ist direkt zur Beobachtung

von Landschaften eingerichtet; die Bilder werden von ihm selbst aufgenommen, und zwar geschieht das durch zwei Spiegel, welche anstatt der beiden Schieber C und D angebracht und gegen das zu betrachtende Objekt gerichtet sind, so daß sie mit einander einen Winkel von 90° bilden, also den beiden kleinen Beobachtungsspiegeln A und B parallel gerichtet sind. Die beiden Spiegelbilder der Landschaft werden nun um so größere perspektivische Abweichung haben, je weiter die beiden äußeren Spiegel von einander abstehen, und mit der Entfernung müssen daher die Tiefendimensionen um so deutlicher hervortreten. Anstatt der Beobachtungsspiegel befinden sich nun bei A und B zwei Prismen, durch deren totale Reflexion die Spiegelbilder mit ungeschwächter Helligkeit erscheinen; sie sind wie die Linsen in dem Brewsterschen Apparat in Hülsen gefaßt, so daß jedes Auge ohne Anstrengung das ihm zukommende Bild betrachten kann.

In Abb. 480 ist eine schematische Darstellung des Telestereoskops gegeben. Die vom Objekt aus kommenden Strahlen gelangen auf den Wegen c b a r, resp. γ β α ρ in die Augen r und ρ des Beobachters. Ein Helmholtzsches Telestereoskop mit Vergrößerung ist in Abb. 481 dargestellt; a a und a_1 a_1 sind die beiden äußeren Spiegel, welche von der größten Vollendung sein müssen, um keine verzerrten Bilder zu geben. Die Objektive liegen bei c und c_1 und können mittels Trieb und Zahnstange i h, resp. i_1 h_1 verschoben



482 u. 483. Doppelfernrohr von C. Zeiß.

werden. Die von a kommenden Lichtstrahlen gelangen durch die Linsen d und e des terrestrischen Okulars auf das Prisma p, von welchem sie in die Okularröhre g reflektiert werden.

Auf dem Prinzip des Telestereoskops beruhen die Doppelfernrohre, welche in der neuesten Zeit von der Firma Carl Zeiß in Jena konstruiert werden und durch die Abb. 482 und 483 dargestellt sind. Schließlich wollen wir noch auf eine sehr sinnreiche, praktische Verwendbarkeit des Stereoskops aufmerksam machen, welche von Dove hervorgehoben worden ist, die in ihren interessanten Effekten zu prüfen unseren Lesern Vergnügen bereiten wird.

Bringt man zwei ganz gleiche Zeichnungen, etwa zwei echte Kassenscheine einer und derselben Art, in einen stereoskopischen Apparat oder betrachtet dieselben mit freien Augen so, daß die beiden Bilder sich zu einem einzigen vereinigen, so wird man, trotzdem daß die Augen zwei Bilder sehen, doch nur den Eindruck einer planen Zeichnung haben, aber keine Tiefenausdehnung bemerken. Sind aber die beiden Kassenscheine nicht von derselben Platte, oder ist die Schrift von einem anderen Satz, so wird die Übereinstimmung nie eine vollkommene sein, denn selbst bei der größten Genauigkeit und Sorgfalt der Setzer werden die Zeilen und Buchstaben gegen einander nicht dieselbe Lage haben. Im Stereoskop tritt dies deutlich hervor; denn in dem vereinigten Bilde zeigen sich die verschobenen Worte nicht mehr in einer Ebene liegend, sondern sie erheben sich treppenartig über einander; sie schweben gleichsam in der Luft; die beigedruckte Satzprobe Abb. 484 gibt dafür ein sprechendes Beispiel.

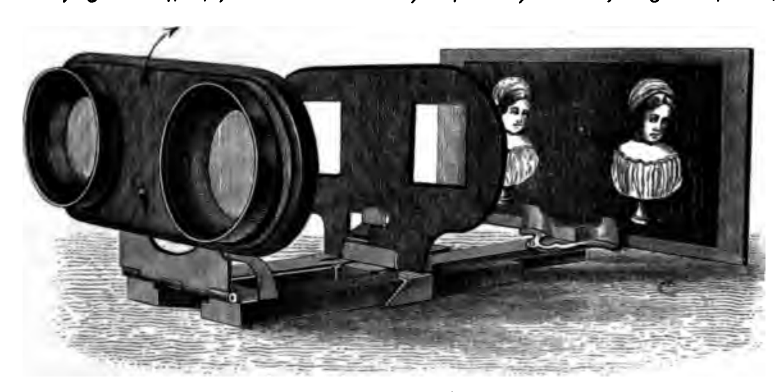
In der ersten Zeile bilden die fünf Worte gleichsam eine von links nach rechts zu abfallende Treppe; das Wort „Tröste“ steht auf der obersten Stufe, „dich“ steht auf der zweiten und so fort, bis das Wort „Gaben“ die tiefste Stelle einnimmt. Die zweite Zeile verfolgt den umgekehrten Weg von unten nach oben: das Wörtchen „Nicht“ ist scheinbar das tiefste, „glückt“ dagegen das höchste; in der dritten Zeile erscheinen die Worte in zwei Ebenen angeordnet, so daß „Was“, „Weise“ und „erhaben“ höher als die dazwischen

Tröste dich, wenn edlen Gaben Nicht des Volkes Jubel glückt. Was der Weise sieht erhaben, Ist der Menge oft verrückt.	Tröste dich, wenn edlen Gaben Nicht des Volkes Jubel glückt. Was der Weise sieht erhaben, Ist der Menge oft verrückt.

484.

liegenden Wörtchen „der“ und „sieht“ zu stehen scheinen. Wer von unseren Lesern seine Augen so richten gelernt hat, daß er stereoskopische Bilder ohne Apparat zur Deckung zu bringen vermag, für den wird die Prüfung solcher Erscheinungen noch genußreicher sein als für denjenigen, der die beiden Bilder erst hinter die Prismen eines stereoskopischen Apparates bringen muß.

Dove schlug nun vor, zwei Drucke, über deren Identität Zweifel herrschen, also z. B. einen verdächtigen Kassenschein und einen echten, durch Betrachtung im stereoskopischen



485. Stereoskop zum Zusammenklappen und Tragen.

Apparate mit einander zu vergleichen. Jedes Heraustreten der Schrift oder der Zeichnung aus der Ebene würde auf ein Falsifikat unzweifelhaft hindeuten. Ebenso wird man durch eine stereoskopische Betrachtung augenblicklich Nachdruck vom Originaldruck, Titelauflagen von wirklichen Neudrucken u. s. w. zu unterscheiden vermögen. Und was von Drucken gesagt ist, gilt natürlich von jeder Kopie. Die Nachahmung mag noch so geschickt gemacht sein — der stereoskopische Apparat ist ein sicheres Mittel, sie zu entlarven, und wenn er auch den Fälscher selbst auf die Mangelhaftigkeit seiner Produkte aufmerksam machen kann, so kann er ihm doch nicht in gleicher Weise die Mittel einer genügenden Abhilfe gewähren.

Das Teleskop.

Geschichtliches über die Erfindung. Die Einrichtung des Fernrohres. Das holländische oder Galileische Fernrohr. Das astronomische oder Keplersche Fernrohr. Erdfernrohre. Äußere Einrichtung und Aufstellung. Weitere Vervollkommnung durch Euler, Dollond, Fraunhofer. Der Fraunhofersche Refraktor auf der Dorpater Sternwarte. Das Passageninstrument. Die berühmtesten Refraktoren. Spiegelteleskope. Geschichte des Spiegelteleskops. Riesenteleskope. Verschiedene Einrichtungen nach Newton, Gregory und Herschel. Was sieht man durchs Fernrohr?

Es war in den ersten Jahren des 17. Jahrhunderts, als in der holländischen Stadt Middelburg das Fernrohr erfunden wurde. Ganz sicher ist die Jahreszahl nicht zu bestimmen.

Es heißt, die Kinder des Middelburger Brillenmachers Zacharias Jansen hätten mit Glaslinsen, die ihr Vater in seinem Geschäft verfertigte, gespielt. Dabei hätte zufällig das eine zwei solcher Linsen in gerader Linie etwas entfernt von einander vors Auge gehalten und nach dem Knopfe eines entfernten Turmes geschaut, und da es denselben plötzlich viel größer und näher erblickt, habe es seine Gespielen auf diese Erscheinung aufmerksam gemacht; der Vater wäre dann dazu gekommen, hätte das Experiment wiederholt, und durch verständige Benutzung des Beobachteten wäre so das Fernrohr erfunden worden.

Nach einer anderen Version soll der Brillenmacher Hans Lipperstein, Lippersheim oder Laprey, wie er verschieden genannt wird, von einem Unbekannten aufgesucht und beauftragt worden sein, einige hohle und erhabene Gläser nach seiner Angabe zu schleifen. Als dieselben fertig waren, nahm sie der Fremde in die Hand und beobachtete, indem er ein hohles und ein erhabenes Glas bald näher, bald weiter von einander hielt, durch sie hindurch die Gegend. Der Glasschleifer versuchte, sobald er wieder allein war, in gleicher Weise durch ähnliche Gläser zu blicken. Von dem Erfolg überrascht, sei er auf die Idee gekommen, die Linsen in geeigneter Entfernung dauernd mit einander zu befestigen, und habe so ein Fernrohr verfertigt, welches er dem Prinzen Moritz von Nassau vorgelegt habe.

Nach anderen soll der Sohn des Mathematikers Adrian Metius durch einen ähnlichen Zufall, wie er die Kinder des Zacharias Jansen geleitet, die Erfindung gemacht haben.

Noch andere aber, die wahren Ben Akibas, gehen viel weiter ins graue Altertum zurück und möchten die Nachricht von einem Bilde des Ptolemäus Claudius aus dem 13. Jahrhundert, auf welchem dieser dargestellt gewesen sei, wie er die Gestirne durch ein aus mehreren Teilen zusammenschiebbares Rohr betrachtet, dahin deuten, daß die Erfindung schon vor sechs Jahrhunderten gemacht worden sein müsse. Und wenn man einige Äußerungen des Roger Baco (1214—1294) wörtlich verstehen dürfte, so könnte diese Annahme allerdings einen Grad von Wahrscheinlichkeit bekommen. Indessen sind seine Andeutungen zu kurz und zu unklar, als daß man annehmen könnte, er würde einen so wichtigen Gegenstand nur so flüchtig behandelt haben. Da auch in den Schriften seiner Zeitgenossen und Nachfolger sich nichts findet, was das Alter des Fernrohres um mehr als drei Jahrhunderte vergrößern könnte, dagegen an verschiedenen Stellen im Beginn des 17. Jahrhunderts der neuen Erfindung bewundernd gedacht wird, so dürfen wir mit ziemlicher Sicherheit die Erfindung des Fernrohres in diese Zeit versetzen.

Das Genauere über die ersten Anfänge der Erfindung hat, soweit dergleichen den Nachkommen aus einzelnen, oft ungewissen, absichtlich oder unabsichtlich gefälschten Überlieferungen herauszuschälen möglich ist, in neuerer Zeit Prof. Harting durch sorgfältige Prüfungen festzustellen gesucht, und wir wollen seinen Angaben als den bei weitem beachtenswertesten hier folgen.

Die erste authentische Nachricht von einem Fernrohr ist eine Resolution der holländischen Stände vom 2. Oktober 1608. Während des spanisch-niederländischen Krieges hatte denselben ein aus Wesel gebürtiger, in Middelburg ansässiger Brillenschleifer Hans Lippersheim ein „Instrument, um weit zu sehen", vorgelegt, weil mit Hilfe desselben im Felde wesentliche Vorteile über den Feind zu erringen sein dürften, und für die Ausbeutung dieser neuen Erfindung um ein Privilegium auf dreißig Jahre oder um eine Pension nachgesucht, wogegen er Geheimhaltung versprach und solche Instrumenta nur

zum Nutzen des Landes und nicht für auswärtige Fürsten und Potentaten anfertigen wollte. Die erwähnte Resolution bestimmte die Niedersetzung einer Prüfungskommission, und dem Erfinder wurde darauf zur Probeablegung die Herstellung solcher Instrumente mit Linsen aus Bergkrystall und auch eins für zwei Augen übertragen. Lippersheim scheint dem Auftrage nachgekommen zu sein, erhielt aber das gesuchte Privilegium nicht; denn inzwischen, am 17. Oktober 1608, war Jakob Adrian Metius mit einem ähnlichen Gesuch für dieselbe, angeblich von ihm gemachte Erfindung aufgetreten. Da schon zwei um denselben Gegenstand wußten, so konnte der ausschließliche Besitz nicht garantiert werden, und man ließ der Konkurrenz freie Bahn.

Ob Metius durch die Erfindung Lippersheims erst auf den Gedanken des Fernrohres gebracht worden ist, ob er gar durch Verrat erst die Einrichtung kennen gelernt, oder ob er sie schon früher selbständig gemacht und als ein verschlossener, geheimthuender Mann niemand eher davon Mitteilung machte, bis der Brillenmacher damit vor die Öffentlichkeit trat, das scheint unaufklärbar zu sein. Genug, er ist der Zeit nach ein Späterer, und die Geschichte nennt deswegen als ersten Erfinder den Middelburger Optiker Hans Lippersheim.

Damit müssen auch alle Ansprüche, welche von anderen Seiten auf die Ehre der Priorität gemacht worden sind, zurückgewiesen werden; manche dieser Ansprüche reduzieren sich allerdings unter Abwägung der Umstände auf ein bescheideneres Maß. So kommt ein gewisser Crepi aus Sedan, welcher von vielen als der Erfinder des Fernrohres angesehen wird, um seinen Ruhm; denn es scheint sicher, daß er indirekt sich den Besitz der Kenntnisse für die Anfertigung verschafft habe. Am 28. Dezember 1608 nämlich schreibt der damalige französische Gesandte Joannin am holländischen Hofe an den König Heinrich IV. und an Sully über die neue Erfindung, von der er sich für den Krieg großen Nutzen versprach. Er hatte sich bereits, wenn auch vergeblich, an Lippersheim gewandt, um das Fernrohr von ihm zu erhalten. Erst durch Vermittelung der Stände erhielt er, als diese die Erfindung nicht ankaufen wollten, zwei Fernrohre für den König, die er denn auch mit seinen Briefen durch einen französischen Soldaten nach Frankreich schickte. Dieser Soldat war aber deswegen zur Überbringung gewählt worden, weil Joannin erfahren hatte, daß derselbe, in mechanischen Künsten sehr geschickt, die Anfertigung der Fernrohre dem Erfinder abgelauscht habe und solche nun selbst nachahmen könne.

Höchst wahrscheinlich ist Crepi nicht nur identisch mit diesem Soldaten, sondern auch derjenige Franzose, welcher im Mai 1609 nach Mailand kam und dem Grafen de Fuentes ein Fernrohr überbrachte; dieses nun sah zufällig ein gewisser Sirturus, der dann sofort nach Venedig reiste, um dort Glas zu kaufen und ein ähnliches Instrument zusammenzusetzen.

Im Juni 1609 war Galilei zu Venedig und hörte von dem Fernrohre. Zu derselben Zeit besaß auch schon der Kardinal Borghese eins, das ihm aus Flandern zugeschickt worden war. Galilei hatte somit Gelegenheit, von der Einrichtung und Wirkungsweise sich durch den Augenschein zu überzeugen. Ob er dies gethan, ob nicht, ist zweifelhaft; es kommt im Grunde auch nicht viel darauf an; denn es erhöht weder die Glorie um das Haupt des großen Pisaners in der Weise, wie seine überschwenglichen Biographen erwähnen, wenn er wirklich bloß auf die Nachricht von der Wirkung kombinierter Linsen hin ein Fernrohr konstruiert hätte, noch auch bricht es aus dem Lorbeer seiner wahren Größe ein einziges Blatt, wenn er das erste seiner Fernrohre, welches er am 23. August 1609 dem Dogen von Venedig überreichte, nach genauer Kenntnis der Einrichtung der holländischen Instrumente zusammengesetzt, dasselbe also nicht erfunden, sondern bloß nachgemacht hätte.

Übrigens waren zu dieser Zeit die Fernrohre in Holland, England und Deutschland bereits ein Handelsgegenstand. Auf der Herbstmesse zu Frankfurt a. M. 1608 wurde zum erstenmal von einem Niederländer eins zum Verkauf angeboten, und in London waren sie das Jahr darauf so zahlreich, daß die Käufer die Auswahl hatten. Sie scheinen auch in Nürnberg bald in großer Menge fabriziert worden zu sein, und in Italien lockten die hohen Preise, welche Galilei für seine Instrumente erhielt (1000 Gulden für eins), die

Optiker, sich auf die Anfertigung dieser merkwürdigen Apparate zu werfen. Hochgestellte Liebhaber und Förderer der Wissenschaften, deren damals mehr als jetzt selbstthätige Mitarbeiter waren, schliffen sich ihre Gläser selbst. So verfertigte nicht lange, nachdem Galilei das erste Fernrohr hergestellt hatte, auch der Fürst Federigo Cesi, Stifter der accademia dei Lincei zu Rom,*) ein Fernglas und gab ihm zuerst auf den Rat des vortrefflichen Gräcisten Joannes Demiscianus nach dem Griechischen den Namen Teleskopium.

Mit der Erfindung des Namens schließen wir diesen kurzen geschichtlichen Überblick. Aber — fragt mancher — wie ist das mit Zacharias Jansen? — ebenfalls Brillenmacher und ebenfalls zu Middelburg, der bis jetzt doch allgemein für den Erfinder des Fernrohrs gegolten hat, und für den sein Landsmann Boreel, Leibarzt am Hofe Ludwigs XIV., so entschieden Partei nahm? — Aus den gerichtlichen Untersuchungen, die in den ersten fünfziger Jahren des 17. Jahrhunderts auf Veranlassung Boreels in Middelburg angestellt, und deren Ergebnisse von einem, nicht mit dem genannten Leibarzt zu verwechselnden, Borel zu einer Schrift verarbeitet wurden, geht hervor, daß Jansen an der Erfindung des Fernrohrs wahrscheinlich keinen Teil hat, daß er aber darum nicht minder der Beachtung der Nachwelt würdig ist als sein Kollege Lippersheim, der dort Lapprey genannt wird; denn wir verdanken ihm eine ebenbürtige That, die Erfindung des Mikroskops, auf die wir im nächsten Kapitel zu sprechen kommen. Wie weit die Ideen beider Instrumente einer Wurzel entsprossen sind, und wie weit Lippersheim, der später zu seiner Entdeckung gelangte, als Jansen (möglicherweise schon 1590), auf diese sich stützte, ist hier nicht zu untersuchen.

Wir haben das Fernrohr zuerst in den Kreis der Betrachtung gezogen, weil seine Einrichtung eine einfachere ist, als die des Mikroskops, und deren Kenntnis uns das Verständnis des zusammengesetzteren Apparats erleichtern wird.

Einrichtung des Fernrohrs. Das Fernrohr ist wie das Mikroskop eine Verbindung zweier Linsen oder Linsensysteme, deren optische Achsen genau in einer Linie liegen. Die eine der Linsen, das Objektiv, wird dem zu beobachtenden Gegenstande zugewandt; es empfängt die von demselben ausgehenden Lichtstrahlen und vereinigt sie in einem Punkte der Achse zu einem umgekehrten verkleinerten reellen Bilde; die andere Linse, das Okular, dient zur Betrachtung dieses Bildes und befindet sich daher zwischen dem Bilde und dem Auge.

Bei den Spiegelteleskopen, deren Einrichtung später ausführlicher besprochen werden soll, ist das Objektiv durch einen Hohlspiegel ersetzt, der in analoger Weise wie die Objektivlinse von dem zu beobachtenden Objekte ein verkehrtes verkleinertes reelles Bild entwirft.

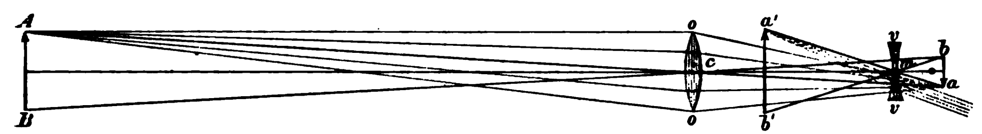
Die Linsen befinden sich in einer innen geschwärzten Röhre, die aus mehreren in einander verschiebbaren Teilen besteht. Dadurch kann je nach dem Bedürfnis der verschiedenen Augen das Okular dem Bilde beliebig genähert werden.

Die verschiedenen Arten der Fernrohre unterscheiden sich von einander durch die verschiedene Einrichtung ihrer Okulare. Das holländische oder Galileische Fernrohr, die ursprüngliche Konstruktion, ist in Abb. 486 dargestellt. Die von dem Gegenstande A B ausgehenden Strahlen werden von dem Objektiv o o gebrochen und treffen, bevor sie sich zu dem umgekehrten verkleinerten, reellen Bilde a b vereinigen auf das aus einer Bikonkavlinse bestehende Okular v v. Dieses ist von a b um etwas mehr, als seine Zerstreuungsweite entfernt, so daß die nach einem Punkte des Bildes a b konvergierenden

---

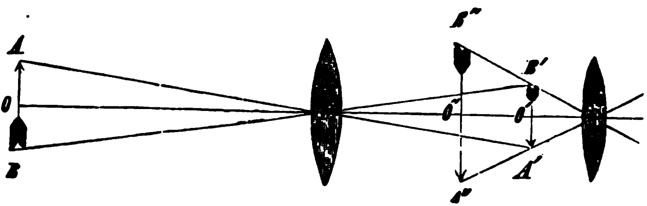
*) Die Accademia dei Lincei wurde 1603 gegründet, 1870 reorganisiert und 1883 Akademie der Wissenschaften benannt. „Fürst Cesi war ein die Wissenschaft liebender Mann, der aus eigenen Mitteln eine Akademie gegründet hatte, die den sonderbaren Namen Accademia dei Lincei führte, d. h. Akademie der Luchse, in Anspielung auf das angeblich scharfe Gesicht des Luchses, welches die Akademiker sich vermutlich in wissenschaftlichen Dingen zum Zielpunkt ihrer Wünsche gestellt hatten. Galilei ward Mitglied dieser Akademie, und sehr bald hatte er Gelegenheit, seine Luchseigenschaft zu bethätigen, indem er im Jahre 1612, wenn nicht das Mikroskop erfand, doch ein solches Instrument zuerst in Italien verfertigte."

Strahlen nach ihrem Durchgange durch das Okular so divergent gemacht werden, als ob sie von einem Punkte vor dem Okular kämen; z. B. konvergieren die von dem Punkte A kommenden Strahlen nach dem Durchgange durch das Objektiv o o nach dem Punkte a, werden aber von dem Okular v v aufgefangen und so gebrochen, daß sie von dem Punkte a' zu divergirene scheinen, der weiter von v v entfernt ist, als a. Diese einfache Einrichtung bietet den großen Vorteil, sehr kurze Röhren anwenden zu können, und deshalb ist sie besonders für Instrumente in Gebrauch geblieben, von denen eine bequeme Handlichkeit verlangt wird. Unbeschadet der Schärfe kann man freilich bei ganz kurzen Röhren die Vergrößerung nicht weit treiben; daher liefern derartige Fernrohre in der Regel nur eine geringe (20—30 fache, als Theaterperspektive 2—3 fache) Vergrößerung. Die Vergrößerung eines holländischen Fernrohrs ergibt sich sehr leicht aus der Brennweite des Objektivs und der Zerstreuungsweite des Okulars. Ohne Fernrohr würde der Gegenstand unter



486. Holländisches Fernrohr.

dem Winkel A c B = a c b erscheinen. Durch das Fernrohr betrachtet, (unser Auge im Mittelpunkt m des Okulars befindlich angenommen) erscheint er unter dem Winkel a' m b' = a m b. Das Verhältnis dieser beiden Winkel gibt daher die Vergrößerung. Nun ist bei hinreichender Entfernung des Objektes das Bild a b vom Objektiv nahezu um die Brennweite f, vom Okular um etwas mehr als dessen Zerstreuungsweite f' entfernt, es verhalten sich also nahezu b c a : b m a = f' : f, also wenn b c a = 1 gesetzt wird, b m a = $\frac{f}{f'}$, d. h. die Vergrößerung ergibt sich als Quotient aus der Brennweite des Objektivs und der Zerstreuungsweite des Okulars. Übrigens hat Galilei schon 1618 ein Instrument für zwei Augen, wie unsere Operngläser, konstruiert und kann daher auch als der Erfinder dieser Binocles angesehen werden.



487. Prinzip des Keplerschen Fernrohrs.

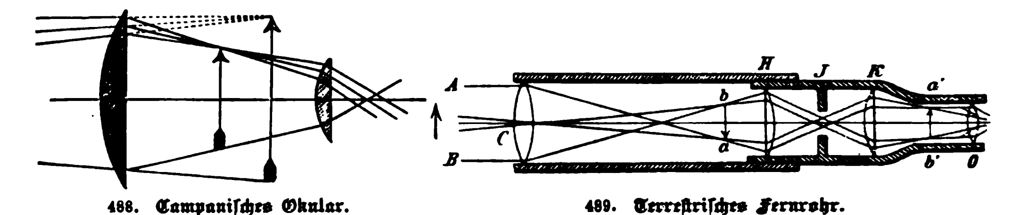
Das astronomische oder Keplersche Fernrohr. Die erste wissenschaftliche Darlegung der Prinzipien, auf denen die Wirkung des Fernrohrs beruht, gab Johannes Kepler; er ist der Erfinder des nach ihm benannten astronomischen Fernrohrs. Es unterscheidet sich von dem holländischen dadurch, daß bei ihm (s. Abb. 487) die durch die bikonvexe Linse C gehenden Strahlen wirklich sich zu einem reellen Bilde A' B' vereinigen, welches durch das Okular C' betrachtet wird (A'' B''). Das Okular ist also hier nicht wie bei dem holländischen Fernrohr eine bikonkave, sondern eine bikonvexe Linse, die wie eine Lupe wirkt.

Da das vom Objektiv erzeugte, verkehrte reelle Bild, durch die Okularlinse betrachtet, nicht umgekehrt wird, so erscheinen im Keplerschen Fernrohr auch alle Gegenstände verkehrt; dasselbe ist deswegen auch nur zur Beobachtung der Gestirne geeignet, bei denen die umgekehrte Lage der Bilder von keinem Einfluß ist. Bei feineren Instrumenten ist an der Stelle, wo das reelle Bild erzeugt wird, ein Fadenkreuz von Spinnwebfäden ausgespannt, um kleinere Ortsveränderungen des beobachteten Gestirns bemerken zu können.

Zwischen das Okular und das Objektiv pflegt noch eine dritte Linse, das sogenannte Kollektivglas, eingeschaltet zu werden. Dasselbe gehört eigentlich noch zum Objektiv; denn es hat den Zweck, die Strahlen, ehe sie sich zu einem Bilde vereinigen, stärker konvergierend zu machen, und liegt deshalb zwischen letzterem und dem Objektiv. Es ist gewöhnlich mit dem Okular in einem Tubus vereinigt. Die Kombination ist zuerst von

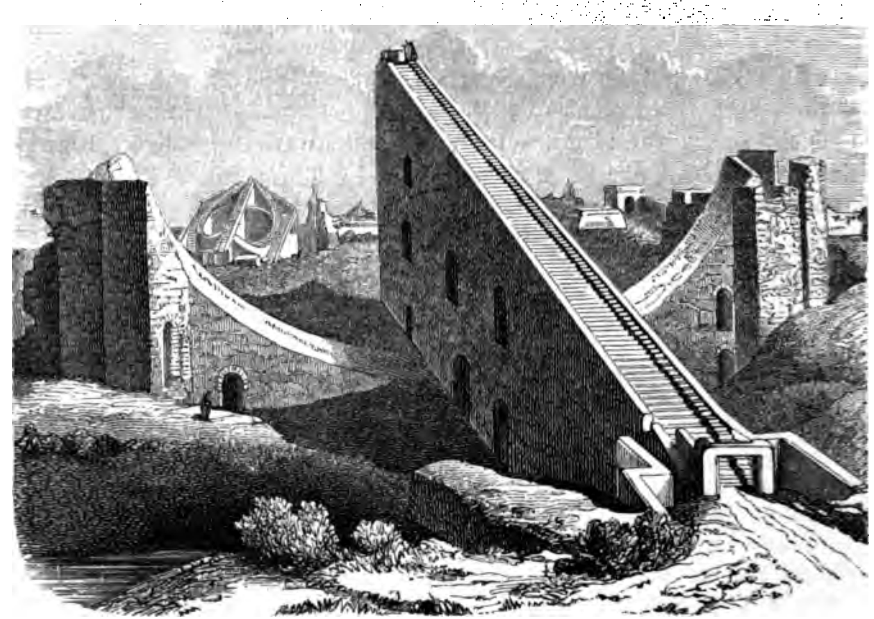
Huyghens für Fernrohre und später von Campani für Mikroskope benutzt worden und ist unter dem Namen des Campanischen Okulars bekannt (s. Abb. 488).

Das terrestrische Fernrohr. Um das Keplersche Fernrohr zur Betrachtung irdischer Gegenstände geeignet zu machen, müßte man, wie schon sein Erfinder bemerkte,



488. Campanisches Okular. 489. Terrestrisches Fernrohr.

behufs Umkehrung des Bildes vor das Okular noch eine dritte Linse setzen. Indessen wurde diese Einrichtung nicht gebräuchlich; Rheita ordnete vielmehr die Gläser der terrestrischen oder Erdfernrohre in der Art an, wie es Abb. 489 zeigt. AB ist das beob-



490. Sternwarte der Brahminen in Delhi.

achtete Objekt, ba das durch die Objektivlinse erzeugte reelle Bild desselben, die Linsen H und K bewirken die Umkehrung des Bildes, und zwar ist K das Kollektivglas; O ist das Okular, durch welches betrachtet das Bild a' b' vergrößert erscheint. Bei den neueren Instrumenten ist die Linse H nochmals durch zwei ersetzt, von denen die eine als eine schwache Sammellinse wirkt.

Die weitere Einrichtung ist für die verschiedenen Fernrohrtypen nahezu dieselbe, soweit sie sich auf die Fassung der Linsen bezieht. Innerhalb der Rohre da, wo die Strahlen die Achse kreuzen, sind Blenden angebracht, um alles überflüssige und reflektierte Licht, das die Deutlichkeit der Bilder beeinträchtigen könnte, auszuschließen. Bei astronomischen Fernrohren ist dies nicht so nötig, weil hier, außer von dem beobachteten Objekt, kein Licht einfallen kann.

Die Vergrößerung des astronomischen wie des terrestrischen Fernrohrs ist, ebenso wie beim holländischen Fernrohr, gegeben durch den Quotienten aus der Brennweite des Objektivs und derjenigen des Okulars. Daher ist die Anfertigung von Linsen mit großer Brennweite eine Kardinalfrage der Optik, und kurze holländische Fernrohre, wie Feldstecher und Theaterperspektive, haben außer ihrem kleinen Gesichtsfelde (wegen der Divergenz der austretenden Strahlen) auch nur eine geringe Vergrößerung, wie bereits erwähnt. Astronomische Fernrohre erhalten dagegen bedeutende Dimensionen, die außerordentliche Präzision der Herstellung und ganz besondere Vorrichtungen erheischen, damit die optischen Achsen der Linsen immer zusammenfallen, die Aufstellung möglichst sicher und dabei das Instrument doch leicht beweglich ist, um ohne Erschütterung der Bewegung des Sternes folgen zu können. Außerdem aber sind behufs genauer Messung noch Einrichtungen getroffen, um die Stellungen der Rohrachse zur Horizontalen und Vertikalen immer bestimmen und korrigieren zu können, die Winkelgrößen zu messen u. s. w., so daß ein solcher Apparat mit all seinem Zubehör höchst kompliziert und bei vollkommener Leistung das größte Kunstwerk der ausübenden Mechanik ist.

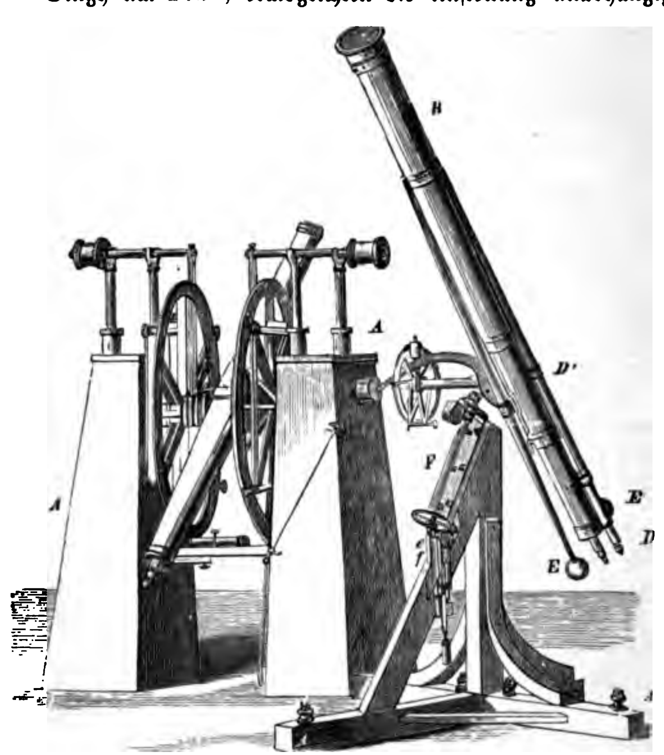

491. Kometensucher von Merz.

Nicht nur die Astronomie und Geodäsie, der das Teleskop von Anfang an diente zur Erforschung des Himmels und der Erde, zur Bestimmung der Bewegung, der Größe, der Masse und der Natur der Gestirne, sondern alle Zweige der Naturwissenschaft, denen das Fernrohr im Laufe der Zeit eines der wichtigsten und ausgezeichnetsten physikalischen Beobachtungs- und Meßinstrumente geworden ist, haben unaufhörlich daran gearbeitet, die Fernrohre mehr und mehr zu vervollkommnen.

Zur Erzielung der Vergrößerung der Bilder gibt es zwei Wege: entweder man steigert die Brennweite des Objektivs, oder man verringert die Brennweite des Okulars. Der letztere Weg ward vor der Entdeckung der Gesetze der Achromasie und der Kunst, durch geeignete Zusammensetzung von Linsen die Farbenzerstreuung aufzuheben, sehr begrenzt, und es blieb, um stärkere Vergrößerungen zu erreichen, nichts übrig, als Linsen von großer Brennweite als Objektive anzuwenden. Das Arrangement derselben wurde aber dadurch in gleichem Maße erschwert, weil die Röhren, innerhalb deren die Linsen anzuordnen waren, eine der Brennweite entsprechende Länge erhalten mußten und infolgedessen ein zu bedeutendes Gewicht erhielten, um sich mit der nötigen Leichtigkeit handhaben zu lassen, und weil ferner mit der wachsenden Länge der Röhren die Gefahr sich erhöhte, daß sie sich krümmen, was das Allerschlimmste ist.

Man griff zwar zu dem Aushilfsmittel, den mittleren Teil des Rohres, der ja nur als Blende dient, ganz fortzulassen und die Objektive in einer kurzen Röhre an einem festen Punkte derart anzubringen, daß sie nach den betreffenden Beobachtungsobjekten leicht gerichtet werden konnten, und konnte somit die Okulare in weite Entfernung davon bringen. Solche Luftfernrohre wandte, wie es scheint, zuerst Huyghens um das Jahr 1684 an. Auf der Sternwarte zu Delhi (Abb. 490), deren eigentümlicher Bau lediglich durch diese Art der Aufstellung bedingt war, hatten die beobachtenden Brahminen noch in den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts derartige Fernrohre in Gebrauch. Ein gegen 30 m hohes

Mauerwerk diente zur Befestigung des Objektivs, während das Okular je nach dem Stande des zu beobachtenden Gestirnes rechts oder links davon und mehr oder weniger hoch auf einer in einer Kurve ansteigenden Treppe aufgestellt wurde. Diese Treppe ist auf unserer Abbildung nicht angegeben. Die indischen Beobachtungsbauten, deren man auf unserer Abbildung zwei sieht, und deren auch eine in Benares noch erhalten ist, dienten wesentlich als Gnomone. Am Tage wurden sie als Sonnenuhren benutzt, indem der Schatten der mit der Erdachse parallel gerichteten Kante der Mittelmauer auf dem in Stunden und Minuten geteilten, gemauerten Cylinder, den die Abbildung deutlich erkennen läßt, die (Sonnen-) Zeit anzeigte. In der Nacht wurden von den Teilpunkten jenes Cylinders aus die Sternenaufgänge über die Mauerkante beobachtet. Die beiden in Delhi nahe bei einander erbauten Rieseninstrumente (errichtet durch Tschai Singh um 1730) ermöglichten die Anstellung unabhängiger, einander kontrollierender Messungen. Die Kante der Mittelmauer des im Vordergrund dargestellten Gnomons ist nicht weniger als 118 engl. Fuß lang. Die Gradteilung an dem Cylinder ist so groß, daß 1 Grad nahezu einen Fuß Bogenlänge umfaßt, die Grade sind in Sechstel geteilt.

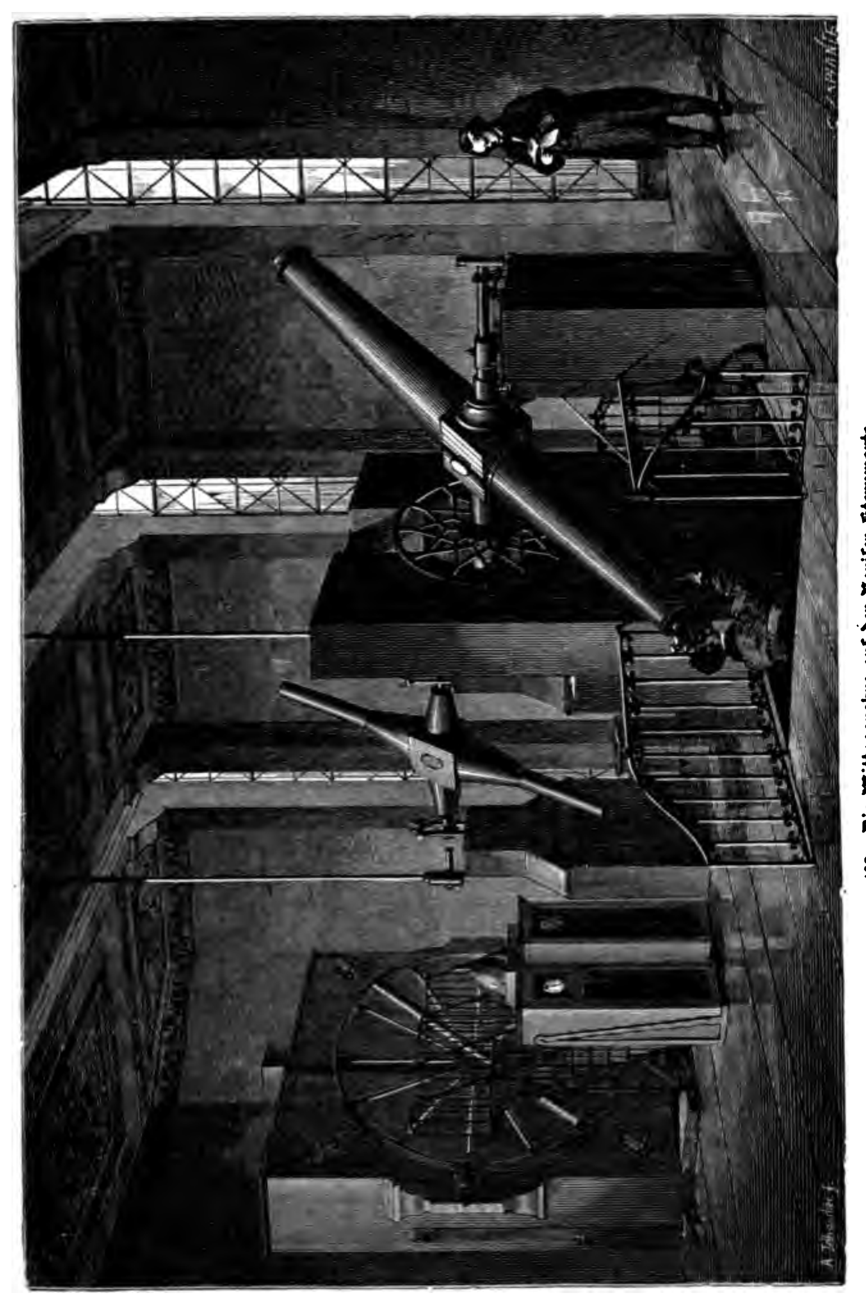


492. Der Repsoldsche Mittagskreis und der Fraunhofersche Refraktor in Dorpat.

Die Luftfernrohre waren schwerfällig und erfüllten ihren Zweck eben nur, solange man nichts Besseres kannte. Nachdem aber durch Cartesius und Huyghens die Erscheinungen der Lichtbrechung genauer untersucht worden, die Theorie des Fernrohrs vollkommen ausgebildet war, Euler die Möglichkeit, achromatische Linsen zusammenzusetzen, nachgewiesen, und der ältere Dollond die ersten achromatischen Fernrohre wirklich angefertigt hatte, verließ man die alten Methoden und benutzte die von der Wissenschaft gemachten und durch die Praxis genügend bestätigten Entdeckungen zur Konstruktion der Fernrohre.

Von dieser Zeit an datiert ein Umschwung in der praktischen Optik, welche, von der Chemie durch Erzeugung geeigneter Glassorten unterstützt und von der Mechanik in gleicher Weise gefördert wurde, wie umgekehrt die Mechanik in anregender Rückwirkung durch die Fortschritte der Optik; in Männern wie Fraunhofer, Steinheil und Merz erreichte sie dann den Höhepunkt ihrer Leistungsfähigkeit. Seit 1812 haben die achromatischen Linsenfernrohre, die bis dahin in den Spiegelteleskopen noch mächtige Nebenbuhler gehabt hatten, diese fast vollständig verdrängt.

Abb. 491 zeigt einen Kometensucher von Merz, der sich im Besitz des Barons von Engelhardt in Dresden befindet. Das Instrument hat eine neue und wenig bekannte, aber recht bequeme Montierung, nämlich auf einem Stuhl. Das Okular befindet sich im Durchschnittspunkt der optischen Achse und der horizontalen Drehungsachse des Fernrohrgestells; infolgedessen bleibt der Körper und der Kopf des Beobachters stets in un-



493. **Die Mittagsrohre auf der Pariser Sternwarte.**
Das Bild zeigt sehr schön die historische Entwickelung der Mittagsrohre: links den Mauerquadranten, dann das kleinere und endlich das neuere Instrument.

veränderter Lage, bei jedem Azimut und jeder Höhe des zu beobachtenden Gestirns. Die Feinbewegung des Rahmens mit dem Fernrohr wird durch das links befindliche Kurbel- und Zahnradsystem hervorgebracht. Der Stuhl aber wird durch das System, welches zur Rechten befestigt und auf der Abbildung nur teilweise sichtbar ist, gedreht.

Wir können uns hier nicht auf eine ausführliche Beschreibung der Instrumente, wie sie auf einer Sternwarte vertreten sein müssen, einlassen, indessen wollen wir den großen Fraunhoferschen Refraktor auf der Dorpater Sternwarte und das Repsoldsche Mittagsrohr in Pulkowa, welche Abb. 492 neben einander zeigt, kurz beschreiben und uns

dann damit begnügen, einige der berühmtesten Instrumente in getreuen Abbildungen vorzuführen.

Das Objektivglas des Fraunhoferschen Refraktors, welcher eine 1420fache Vergrößerung gestattet, hat einen Durchmesser von 24,5 cm und eine Brennweite von 4,3 m; das Rohr B ist nahezu ebenso lang. EE' sind Gegengewichte, welche dazu dienen, das Rohr teils vor Verbiegungen zu sichern, teils Gleichgewicht in seinen verschiedenen Lagen herzustellen und so die Bewegungen des Fernrohrs mit möglichst geringem Kraftaufwande zu ermöglichen. Da das große Fernrohr nur ein verhältnismäßig kleines Gesichtsfeld hat, befindet sich an demselben ein kleineres, ihm paralleles, der sogenannte Sucher DD'. Mit diesem kann man einen weit größeren Teil des Himmels übersehen und benutzt ihn daher, um die zu beobachtenden Sterne in das Gesichtsfeld des großen Instruments zu bringen. Das Ganze ruht auf einem an den Boden des Beobachtungsraums fest anzuschraubenden Stativ A, welches eine mit der Weltachse parallel gerichtete Achse F enthält; dieselbe trägt ein Uhrwerk e f g, durch dessen Gang das Fernrohr so gedreht wird, daß es dem Laufe des Gestirns folgt, so daß also dieses stets im Gesichtsfelde bleibt. An dem Dorpater Instrument ist diese Bewegung so vollkommen, daß, wenn das Instrument auf den zu beobachtenden Stern einmal eingestellt ist, derselbe in der Mitte des Fadenkreuzes fixiert zu sein scheint.



494. Universaltransit von Bamberg.

Das andere Instrument, welches die linke Seite der Abb. 492 zeigt, ist ein sogenanntes Mittagsrohr oder Passageninstrument und dient dazu, den Polabstand der Sterne in dem Augenblicke ihres Durchgangs durch den Meridian der Sternwarte zu beobachten. Das Mittagsrohr ruht auf den Granitpfeilern A A und läßt sich mittels einer besonderen Vorrichtung umlegen, so daß das Objektiv auch nach der entgegengesetzten Seite gerichtet und das Himmelsgewölbe in nördlicher sowohl als in südlicher Richtung betrachtet werden kann. Da es sich darum handelt, den Moment des Durchgangs eines Gestirns durch den Mittagskreis festzustellen, so muß die Aufstellung eine solche sein, daß die Vertikalebene, in welcher das Fernrohr bewegt werden kann, genau mit der Ebene des Meridians zusammenfällt. Durch Beobachtung von aufeinander folgenden Durchgängen des Sonnenmittelpunktes durch den Kreuzungspunkt des Fadenkreuzes des Beobachtungsfernrohrs reguliert man die astronomische Uhr, welche dann benutzt wird, anzugeben, zu welcher Zeit ein Stern den Meridian passiert. Um die Rektascension des Gestirnes genau zu messen, dienen die beiden großen Kreise an der Seite des Rohres. Diese sind auf das genaueste in Grade, Minuten und Sekunden geteilt und

lassen sich an einem feststehenden Zeiger vorüber bewegen. Ist das Instrument genau justiert und das Gestirn im Fadenkreuz, so liest man mit Hilfe von Lupen an den Kreisen den Elevationswinkel ab. Zur Horizontierung des Instruments befinden sich an mehreren Stellen desselben Wasserwagen. Die Vergrößerung ist etwa eine 245fache.

Die Aufstellung der Mittagsrohre oder Durchgangsinstrumente bot lange Zeit die einzig sichere Orientierung in den Meridian. Mit der fortschreitenden Vervollkommnung der Methoden und der Präzisionsapparate jedoch ist es auch möglich geworden, andere Vertikalebenen durch genaue Winkelmessungen sicher auf jene natürlich gebotene zu beziehen und zu diesem Zwecke Instrumente zu erbauen, welche für jedes beliebige Horizontal-Azimut dieselben Beobachtungen anzustellen ermöglichen, welche durch die früheren Passageninstrumente auf den Meridiankreis allein beschränkt waren. Ein solches Instrument ist der in Abb. 494 abgebildete Universaltransit von Bamberg, welcher sich nebst seinem Fundament LL MM in horizontaler Ebene auf einem geteilten Kreise um dessen Vertikalachse drehen läßt, während das eigentliche Fernrohr B C D seine Vertikalbewegung wie jedes andere Passageninstrument dann in der genau gegen den Meridian bestimmbaren Ebene ausführt. Dieses Instrument hat hier noch die besondere Einrichtung, daß es in der Mitte gebrochen ist. Die Lichtstrahlen werden durch einen innen im Knie angebrachten Reflexionsapparat in das seitlich bei D befindliche Okular geleitet. Diese Einrichtung bietet eine größere Bequemlichkeit für den Beobachter.



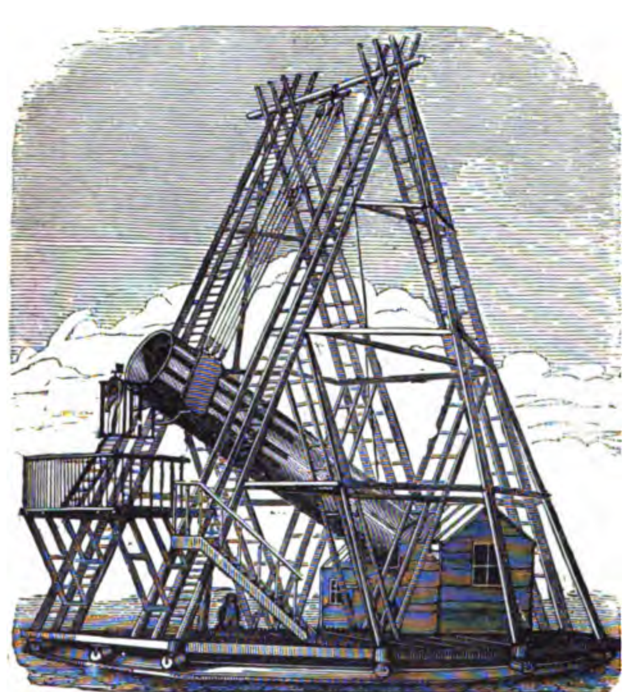
495. Friedrich Wilhelm Herschel.

In England hat man in neuerer Zeit sehr große Instrumente ausgeführt, besonders hat ein Instrument des Vikar Craia zu Wandsworth, zu denen Slatter die Bestandteile lieferte, Aufsehen erregt. Die Größe allein ist indessen nicht maßgebend; die Linsen, welche aus dem Utzschneider-Fraunhoferschen optischen Institut in München stammen, sind jedenfalls bisher nicht übertroffen.

Einen sehr glücklichen Gedanken, dessen Ausführung eine bedeutende Vergrößerung des Objektivs ermöglichte, hat Littrow gehabt. Es ist nämlich ungleich schwieriger, große durchweg homogene Flintglaslinsen herzustellen, als solche von Crownglas. Anstatt nun die beiden Linsen auf einander zu kitten, in welchem Falle beide gleichen Durchmesser haben müßten, um alle Strahlen ausnutzen zu können, schlug Littrow vor, die Flintglaslinse in einigem Abstande hinter der Crownglaslinse anzubringen und sie

nur so groß zu wählen, als es das von der Crownglaslinse bereits konvergent ge-
machte Strahlenbündel fordert. Solche Fernrohre hat Plößl in Wien seit 1832 aus-
geführt; sie sind unter dem Namen dialytische Fernrohre rasch in ausgedehnten Ge-
brauch gekommen.

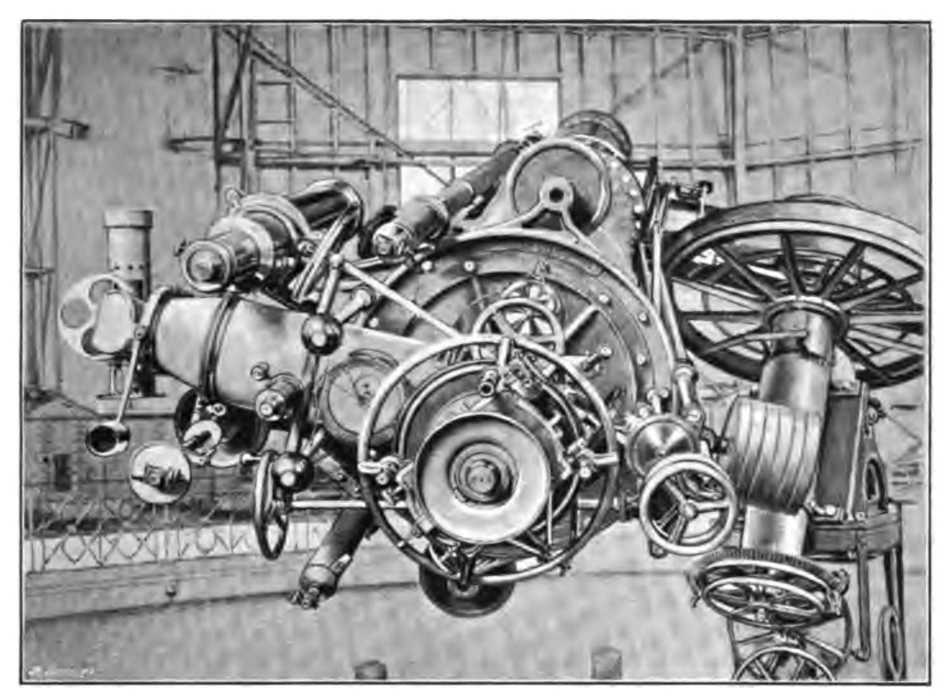
In neuester Zeit haben die Nordamerikaner auf diesem Gebiete Bedeutendes ge-
leistet. Besonders hat die Anstalt des Optikers Alvan Clark in Bezug auf Leistungs-
fähigkeit für Riesenteleskope bis zu 75 cm und mehr Öffnung das Merzsche Institut in
München übertroffen. Wegen der Vorzüglichkeit der Clarkschen Fernrohre hat die russisch
Zentralsternwarte zu Pulkowa, welche bereits einen vorzüglichen Refraktor besaß, ei
Rieseninstrument von 75 cm freier Öffnung und 26,8 m Brennweite bei Clark an-
fertigen lassen. Um sich von den ungeheuren Verhältnissen eines solchen Fernrohrs ein
Vorstellung zu bilden, sei erwähnt, daß das Gesamtgewicht des Objektivglases und seine
Fassung nahezu 5 Zentne
beträgt. Ein zweiter, no
größerer Refraktor, dessen Ob-
jektivglas 95 cm Durchmesse
erhalten wird, ist von Clar
für die Lick-Sternwarte a
dem Mount Hamilton in Kali-
fornien gebaut.



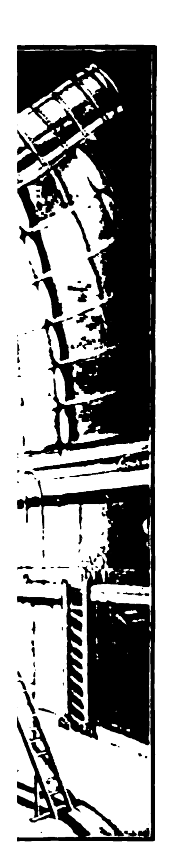
496. Herschels Riesenteleskop.

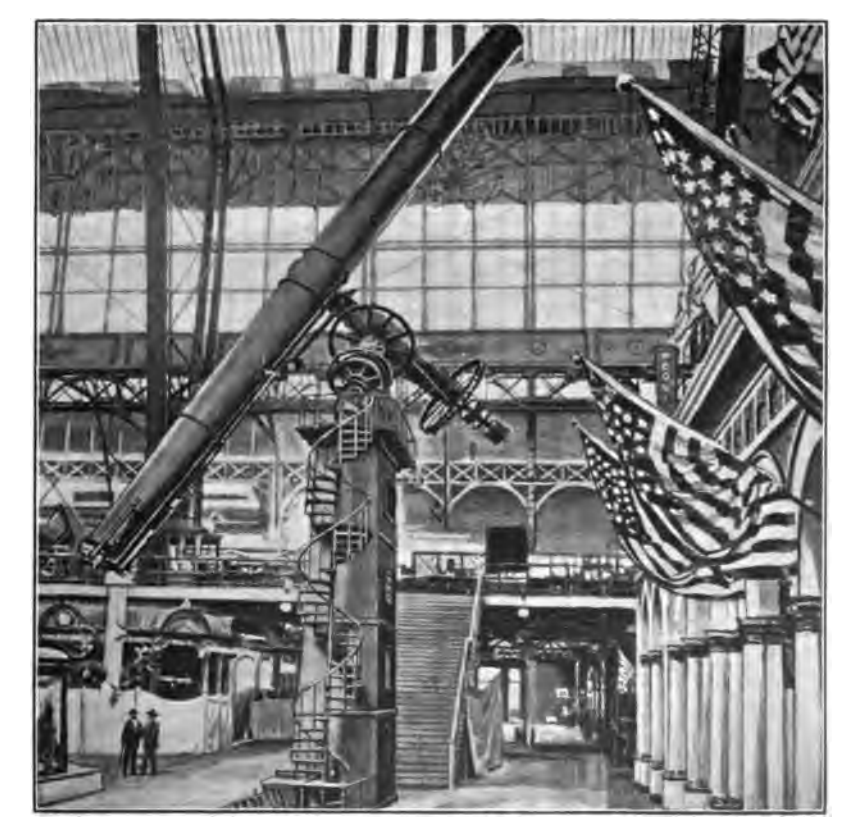
Auf unserer Tafel sind di
berühmtesten Refraktoren de
Welt zusammengestellt, un
zwar in Abb. 1 der zwölf
zöllige Refraktor der Urania
Sternwarte in Berlin, i
Abb. 2 das Äquatoreal-Coud
der Pariser Sternwarte, i
Abb. 3 der Straßburger Re-
fraktor (18-Zöller), in Abb.
der Wiener Refraktor (27
Zöller), in Abb. 5 der Pulko-
waer Refraktor (30-Zöller
in Abb. 6 das Okularend
des letzteren, in Abb. 7 de
Refraktor der Lick-Sternwar
(36-Zöller) und in Abb.
das Yerkes-Teleskop (40
Zöller). Im königlichen Ob-
servatorium zu Greenwich ist endlich das von Sir Henry Thompson geschenkte astronomisch
Teleskop aufgestellt worden. Es ist jedoch eher eine Vereinigung von verschieden
Teleskopen und vermutlich das stärkste Instrument seiner Art, das bis jetzt hergeste
wurde zur Vornahme astronomischer Forschungen mittels der Photographie. — Das ne
Instrument ist genau zweimal so groß sowohl bezüglich der Öffnung als der Fokallän
als das größte photographische Teleskop, das im Observatorium vorhanden war. — B
der Aufstellung des neuen Teleskopes hat man jede Vorsicht gebraucht, um bei der Mo-
tierung jede Bewegung und jede Erschütterung zu vermeiden. — Unter den Neuerung
und Verbesserungen des Herrn Howard Grupp, der dieses Instrument eingeführt hat,
die bemerkenswerteste, daß eine vollständige Zirkumpolarbewegung des Instrumentes mö
lich ist, selbst wenn es nach den Polen gerichtet ist. Es kann außerdem den Bewegung
eines Sternes auf seinem Laufe über den Meridian folgen, bis er am Horizont v
schwindet, ohne daß es nötig wäre, das Instrument umzukehren. — Das Uhrwerk, d
die Polarachse in Bewegung setzt, hat ein 12 Zentner wiegendes Gewicht, das in je
Minuten einen Fuß fällt. Ein Elektromotor besorgt das Aufziehen. Der neue pho





6. Okularende des Pulkowaer Refraktors.

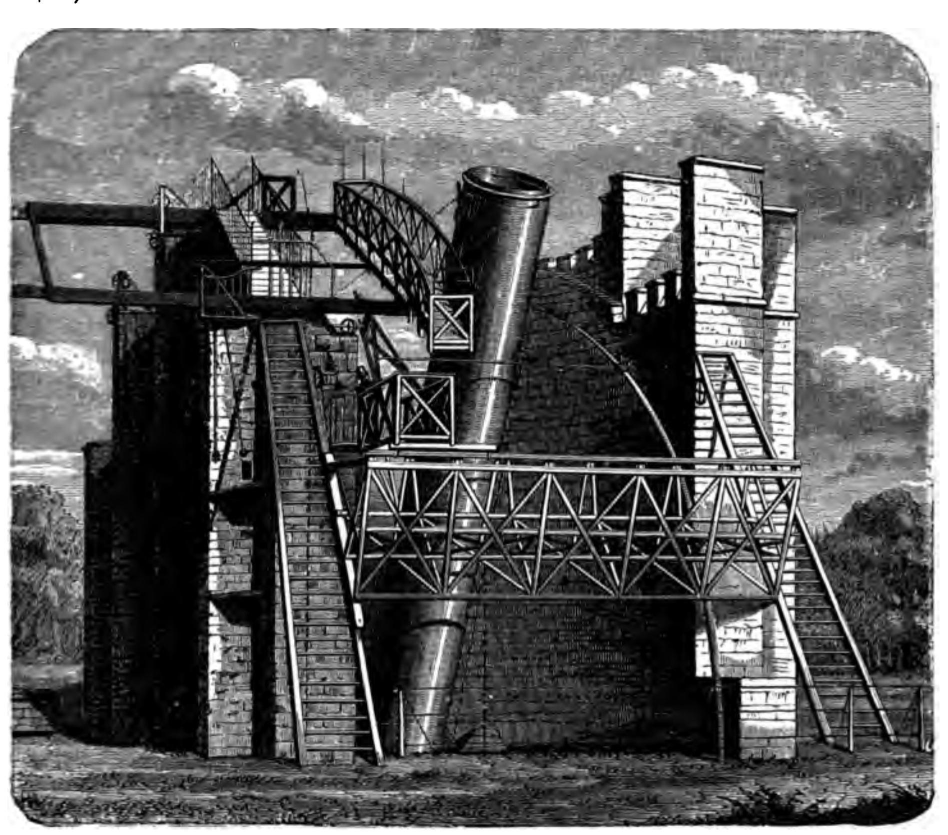




8. Yerkes-Teleskop.

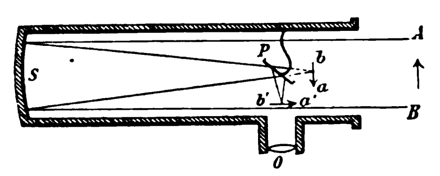
graphische Strahlenbrecher hat ein Objektivglas von 26 englischen Zoll Durchmesser und die Fokallänge 22 Fuß 6 Zoll. Die photographischen Aufnahmen werden zweimal so groß sein, als der Maßstab der astrographischen Karten, d. h. sie werden zwei Millimeter auf eine Minute betragen. Das Instrument kann auch zu spektroskopischen Zwecken gebraucht werden. Es wiegt 10—12 Tonnen, das Objektivglas mit Fassung wiegt etwa $3^1/_2$ Zentner, der Spiegel des Teleskopes mit Fassung 5 Zentner.

Außer den Refraktoren werden für astronomische Zwecke, wie schon erwähnt wurde, die Reflektoren oder Spiegelteleskope angewandt, die vorzugsweise zu Newtons Zeit, als es noch nicht gelungen war, die farbigen Ränder der Linsenbilder zu beseitigen, in Aufnahme kamen.



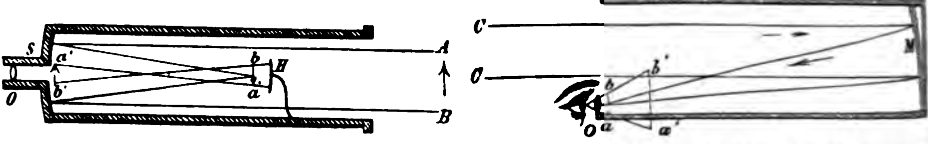
497. Das Rossesche Instrument bei Schloß Parsonstown.

Die Reflektoren oder Spiegelteleskope wurden sehr bald nach den Linsenfernrohren erfunden; Zucchi, ein Jesuitenpater, scheint zuerst auf den Gedanken gekommen zu sein, metallene Hohlspiegel statt der gläsernen Objektive anzuwenden und die reellen Bilder derselben durch eine Okularlinse zu betrachten. Er soll diese Idee 1616 auch ausgeführt haben, was um so bemerkenswerter ist, als Kepler erst mehrere Jahre später in dem astronomischen Fernrohr die Konkavlinse als Okular anwandte. Zucchis Erfindung wurde nur in Italien bekannt. In Frankreich versuchte Mersenne im Jahre 1639 die Hohlspiegel für Teleskope anzuwenden, aber weder hier noch in England, wo Gregory sich deren Vervollkommnung angelegen sein ließ, schenkte man den Spiegelteleskopen anfänglich Beachtung. Selbst Newton, dessen irrtümliche, aber folgenschwere Behauptung,



498. Newtons Spiegelteleskop.

es lasse sich kein achromatischer Refraktor herstellen, den Hoffnungen der Optiker und Astronomen nach dieser Richtung hin eine enge Grenze setzte, wandte sich von den Reflektoren



499. Durchschnitt des Gregoryschen Instrumentes. 500. Einrichtung des Herschelschen Spiegelteleskops.

wieder ab, nachdem er mit eigner Hand zwei solcher Instrumente hergestellt hatte, von denen das eine noch im Museum der Royal Society in London aufbewahrt wird und die Inschrift trägt: „Invented by Sir Isaac Newton and made with his own hands. In the year 1671.“



501. Mond im letzten Viertel. Nach einer Photographie.

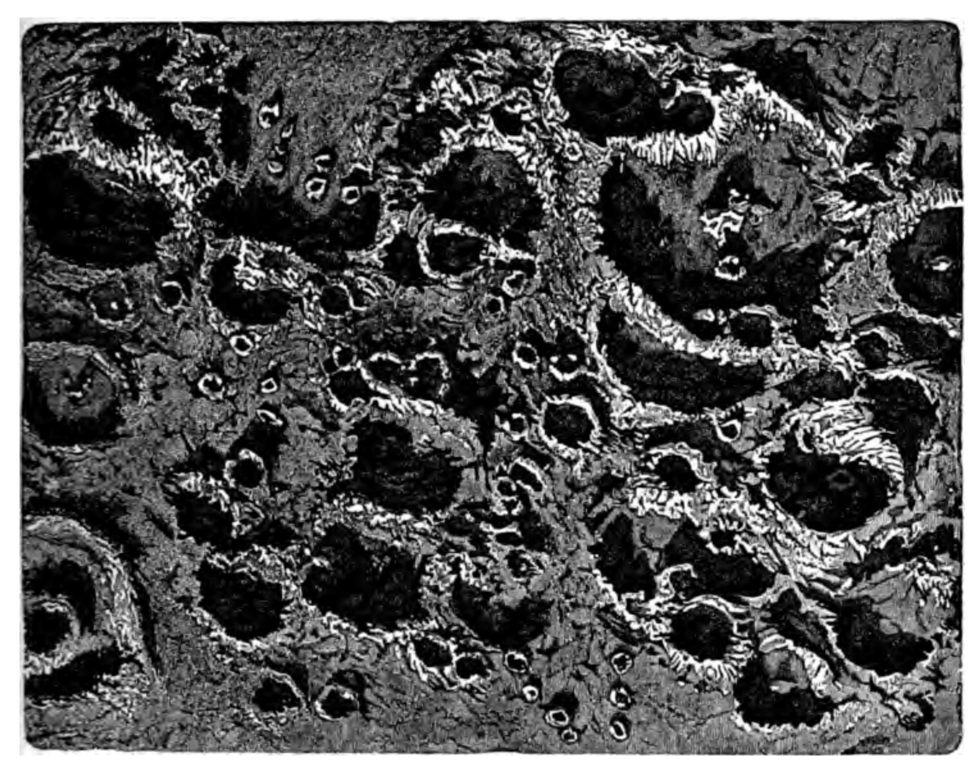
Die Spiegelteleskope kamen erst in Gebrauch, als Hadley, Hawksbee in England und Cassegray in Frankreich ausgezeichnete Instrumente herzustellen gelehrt hatten; da aber zu derselben Zeit in der Herstellung der Glaslinsen so große Fortschritte gemacht wurden, kamen sie nie in ausschließliche Verwendung. Berühmt wurden in England die Spiegelteleskope von James Short, vor allen aber die Rieseninstrumente, durch deren Bau und Anwendung sich W. Herschel zum berühmtesten Optiker und größten Astronomen seiner Zeit gemacht hat.

Er verfertigte eigenhändig eine große Anzahl von Spiegeln, von einer solchen Vollkommenheit, daß er bei Reflektoren von 6 m Brennweite eine 2000fache Vergrößerung unbeschadet der Deutlichkeit der Bilder anwenden konnte. Das größte seiner Teleskope, von dessen Aufstellung uns Abb. 496 eine Ansicht gibt, vollendete er im Jahre 1789. Die Länge des Rohres betrug 12 m, der Durchmesser 1,5 m, sein Gewicht 2500 kg. Der Spiegel allein wog mehr als 1000 kg; er lieferte eine 6400fache Vergrößerung. Die Kosten dieses Rieseninstruments beliefen sich auf nahezu 42000 Mark; Geld und Mühe brachten aber nicht den erwarteten Nutzen, denn nicht lange nach seiner Aufstellung verlor der Spiegel in einer einzigen feuchten Nacht seine schöne Politur. Lord Rosse hat dieses Herschelsche Instrument durch ein noch größeres übertroffen (Abb. 497), dessen Rohr 16 m Länge, dessen Spiegel nahe an 2 m Durchmesser und über 3800 kg Gewicht hat, und dessen Gesamtgewicht 15000 kg beträgt. Es ist zwischen Mauerwerk von 20 m Länge und 13 m Höhe aufgestellt und soll seinen Erbauer gegen 240000 Mark gekostet haben.

Die innere Einrichtung eines Spiegelteleskops ist einfach und wird aus den auf S. 395 u. 396 gegebenen Abb. 498—500 leicht verständlich. Die Abb. 498 gibt uns ein Newtonsches Instrument im Durchschnitt. Dasselbe besteht aus einem großen hölzernen

Rohre, an dessen einem Ende der parabolisch gekrümmte Metallspiegel S liegt. Die von einem Gegenstande AB auf ihn fallenden Lichtstrahlen werden von ihm auf den kleinen, unter 45° geneigten Planspiegel P reflektiert. Derselbe befindet sich in solcher Entfernung vom Hohlspiegel, daß die von letzterem reflektierten Strahlen, bevor sie sich zu einem reellen Bilde b a vereinigen, auf den Planspiegel treffen, so daß das Bild also erst bei b' a' zustandekommt und durch das seitlich angebrachte vergrößernde Okular O betrachtet wird. Anstatt des kleinen Planspiegels wird häufig auch ein totalreflektierendes Prisma angewandt.

Die älteren Gregoryschen Instrumente (Abb. 499; zuerst im Jahre 1663 angefertigt) hatten eine andere Einrichtung. Bei ihnen ist der große Hohlspiegel S in der Mitte durchbrochen von einer kreisrunden Öffnung, welche das Okularrohr O enthält. In der Achse befindet sich ein kleiner Hohlspiegel H, welcher das von dem großen Hohl-



502. Eine Kraterlandschaft des Mondes bei untergehender Sonne.

spiegel S entworfene verkleinerte und umgekehrte Bild b a des Gegenstandes A B zu einem vergrößerten und aufrechten a' b' macht; dieses wird durch das vergrößernde Okular O betrachtet.

Die ganz großen Instrumente, wie das oben erwähnte Herschelsche Riesenteleskop, sind nach Art der Abb. 500 eingerichtet. Bei ihnen betrachtet der vom Objekte C C abgewandte Beobachter das von dem etwas geneigten Spiegel M zurückgeworfene Bild a b mittels des vergrößernden Okulars O. Die Spiegelteleskope, welche von den Refraktoren in den Hintergrund gedrängt worden waren, schienen in neuerer Zeit, namentlich nachdem Liebig (1856) gelehrt hatte, sehr dauerhafte und lichtstarke versilberte Glasspiegel darzustellen, wieder in Aufnahme zu kommen. Der Umstand, daß bei ihnen das Störende der Farbenzerstreuung wegfällt, würde allerdings lebhaft zu ihren Gunsten sprechen. Steinheil schlug deshalb auch die Anwendung versilberter Hohlspiegel wieder vor, und Foucault in Paris hat daraufhin eine Anzahl sehr guter Instrumente hergestellt, bei

denen der kleine Planspiegel durch ein totalreflektierendes Prisma ersetzt war. Indessen haben dieselben den Vorrang nicht streitig machen können den Refraktoren, welche eine immer größere Vervollkommnung und Verbreitung erhielten.

Die Spiegelteleskope haben mit den Keplerschen, sowie den aus diesen durch Einschaltung eines umkehrenden Okularsystems hervorgegangenen terrestrischen Fernrohren das gemeinsam, daß bei ihnen ein reelles Bild wirklich erzeugt und durch eine vergrößernde Linse betrachtet wird. Die Annäherung oder Entfernung des Okulars an das Bild, welche für verschiedene Augen verschieden ist, wird durch Verschiebung der ineinander gesteckten Röhrenteile, bei gewöhnlichen Instrumenten mit der Hand, bei stark vergrößernden feineren mittels einer Mikrometerschraube bewirkt.

503. Spiralförmiger Nebelfleck in den Jagdhunden.

An dieser Stelle sei noch einiges über die Gebäude, welche zur Aufnahme und zum Schutze der Fernrohre dienen, über die „Sternwarten“ bemerkt. Zwischen den einfachen astronomischen Beobachtungsräumen früherer Zeit und den heutigen zeigt sich ein bedeutender Unterschied. Schon die Wahl des Ortes für die Sternwarte ist heute infolge der gewaltigen Entwickelung des Verkehrs eine andere wie früher. Während man früher die hohe Lage einer Gegend für ganz besonders geeignet zur Errichtung von Sternwarten hielt, kommt heute in erster Linie die Festigkeit des Bodens behufs sicherer Fundierung der Instrumente, sowie namentlich die Ruhe der Umgebung, die Reinheit der Luft, entfernte Lage von Fabriken u. s. w. in Betracht. Man benutzte früher für Sternwarten der besseren Fernsicht halber Türme, wie bei Tycho de Brahes Sternwarte Uranienborg (d. i. Himmelsburg) auf der zwischen Dänemark und Schweden gelegenen Insel Hveen (erb. 1576); auch die Leipziger Sternwarte befand sich bis zum Jahre 1790 auf dem Turme der Pleißenburg. Heute dagegen baut man sie an niedrigen, aber vor allem ruhig gelegenen Plätzen. Dieser Gesichtspunkt war maßgebend für den Bau sämtlicher neueren Observatorien zu Wien, Pulkowa, Straßburg, Potsdam u. s. w. Das letztgenannte dient vorzugsweise zu astrophysikalischen Untersuchungen und ist deshalb, außer mit den Hauptinstrumenten, wie Refraktor, Meridiankreis, Passageninstrument, Chronometern u. s. w., besonders reich mit Spektralapparaten, photographischen und photometrischen Hilfsmitteln u. s. w. ausgerüstet. In jüngster Zeit hat R. Bischoffsheim in Paris

t hochherziger Weise die Summe von $1^1/_2$ Millionen Frank zum Bau einer pracht-
ollen Sternwarte in Nizza gespendet. Die im Bau schon vollendete Sternwarte, welche
uf unserer Tafel dargestellt ist, umfaßt ein Areal von 350000 qm; dieser unge-
eure Raum ermöglicht es, einen sehnlichen Wunsch der heutigen Astronomie zu verwirk-
chen, nämlich für jedes größere Instrument ein besonderes Gebäude zu errichten. Eine
ewaltige Kuppel, die auf einem viereckigen Steinbau von 26 m Länge ruht, zieht zu-
ächst unseren Blick auf sich. Sie enthält einen Refraktor mit einer Objektivlinse von 70 cm
urchmesser und 16 m Brennweite, welche von Gebrüder Henry in Paris hergestellt ist.

Bedeutung des Fernrohrs. Der Nutzen eines so wichtigen Instruments, wie
es Fernrohrs, braucht
eutzutage wohl nicht
ft besonders hervor-
ehoben zu werden.
icht nur dem Reisen-
en ist es ein unent-
ehrliches Instrument,
enn er sich mit den
durchwandernden
egenden im voraus
ekannt machen oder
en Reiz einer Fern-
cht genießen will; aus
er freien Natur hat sich
er Gebrauch des Fern-
ohrs in den geschlosse-
en Raum der Theater,
er Museen und Gale-
en verpflanzt. Und
ie hier zum Vergnü-
en der Menschen, dient
s weit höheren wissen-
haftlichen Zwecken,
icht nur auf den Stern-
arten zur Erforschung
er im unendlichen
aume kreisenden Ge-
irne, sondern auch tief
nten im engen Erd-
hachte beobachtet der
hysiker mit seiner Hilfe
ie Schwingungen des
endels, um daraus
Masse und Dichtigkeit der Erde zu berechnen. Die geringen Ausschläge der Magnetnadel,
elche durch die täglichen Schwankungen des Erdmagnetismus verursacht werden, können
n ihren außerordentlich kleinen Differenzen nur mit Hilfe des Fernrohrs genau beobachtet
nd gemessen werden. Durch sie kündigt sich meistenteils die schöne Erscheinung des Nord-
ichts an, welches Tausende von Meilen entfernt am Polarhimmel aufzuckt; mit Hilfe des
ernrohrs können wir die kurze Zeitdauer messen, in welcher das Licht irdische Entfernungen
urcheilt. Die meisten und die subtilsten Meßmethoden der Naturforscher sind auf die Mit-
irkung des Fernrohrs angewiesen. Allerdings war mit dem Ende des 16. Jahrhunderts
hon die empirische Methode moderner Naturforschung eingeschlagen worden, aus
Beobachtungen und Experimenten allein aber kann man wohl Hypothesen ableiten, aber
eine Gesetze bestätigen. Diese lassen sich nur durch Maß und Messen auffinden und fest-
ellen, und hierfür ist das Fernrohr eines der trefflichsten Hilfsmittel geworden.


504. Orionnebel.

Es lag in der Natur der Sache, daß die Erfolge der Erfindung des Fernrohrs zunächst der Astronomie und Geographie zu gute kommen mußten: hier diente das Fernrohr in seiner einfachsten Gestalt als Beobachtungsmittel, viel später erst wurde es als Hilfsmittel mit anderen Meßapparaten verbunden, wodurch die Maßbestimmungen einen ungleich höheren Grad von Genauigkeit erreichten, als früher.

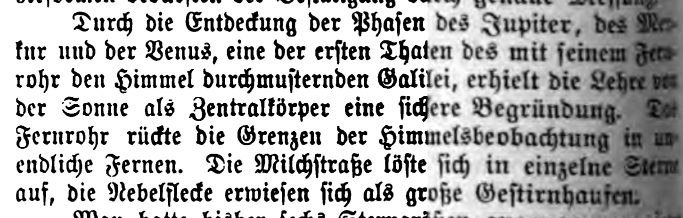
Welches war der Umfang der Kenntnis des Himmels zur Zeit des Ptolemäus, welche Fortschritte sind von da bis zum Ausgange des 16. Jahrhunderts gemacht worden, und auf welcher Stufe steht jetzt, nach einem viel geringeren Zeitraume, die Astronomie! Während die Fortschritte in den anderthalb tausend Jahren vor der Erfindung des Fernrohrs sich so ziemlich darauf beschränkten, das Ptolemäische Fixsternverzeichnis zu vervollständigen, haben sich seit drittehalb Jahrhunderten die Ergebnisse der beobachtenden wie der theoretischen Astronomie durch die Arbeiten von Männern wie Kopernikus, Kepler, Galilei, Newton, Huyghens, Laplace, Olbers, Gauß, Bessel und zahlreichen anderen zu einem vorher ungeahnten Reichtume aufgespeichert.

Anfänglich kannte man nur sieben Planeten; einzelne bedeutendere Kometen erschreckten die Gemüter durch ihr seltenes und unvermutetes Erscheinen, die Milchstraße war ein unerklärlicher Nebel.

Trotzdem hatten Fleiß und Scharfsinn die geringen Mittel trefflich verwerten gelehrt und zur Aufstellung des Kopernikanischen Systems sowie zur Entdeckung der Keplerschen Gesetze geführt. Aber damit war auch das Höchste geleistet, und diese bedeutenden Reformen bedurften der Bestätigung durch genaue Messung.



505. Ringnebel in der Leier.



Durch die Entdeckung der Phasen des Jupiter, des Merkur und der Venus, eine der ersten Thaten des mit seinem Fernrohr den Himmel durchmusternden Galilei, erhielt die Lehre von der Sonne als Zentralkörper eine sichere Begründung. Das Fernrohr rückte die Grenzen der Himmelsbeobachtung in unendliche Fernen. Die Milchstraße löste sich in einzelne Sterne auf, die Nebelflecke erwiesen sich als große Gestirnhaufen.



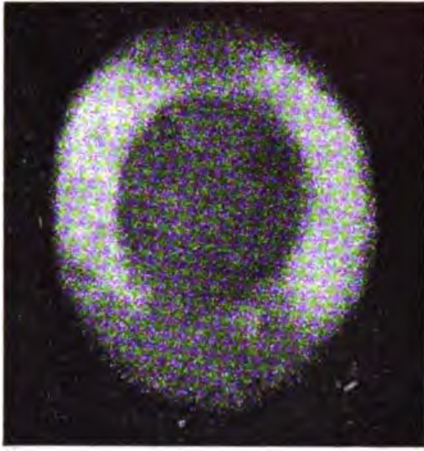
Man hatte bisher sechs Sterngrößen angenommen, jetzt sah Galilei an Stellen des Himmelsgewölbes, welche dem unbewaffneten Auge leer erschienen, unzählige neue Welten. Er bezeichnete sie als Sterne siebenter Größe, „der Ersten der unsichtbaren Dinge“. Im Orion entdeckte er über 500 neue Sterne und mehr als 36 in den Plejaden, in denen man bisher ihrer nur sieben gekannt hatte. Und zurückkehrend aus dem weiten Raume in unser Sonnensystem, beobachtete er zuerst die Sonnenflecken, aus deren Veränderung er auf eine Umdrehung der Sonne um ihre eigene Achse schloß. „Die Zahl der Kometen am Himmel ist größer als die der Fische im Meer“, rief Kepler, als er mit seinem neu erfundenen Fernrohr überrascht die Menge dieser Gestirne erkannte. Aus der Verschiedenheit der Lichtreflexe an einzelnen Partien des Mondes schloß man auf das Vorhandensein von Bergen, Thälern und Meeresbecken. Den Alten war der Begleiter unserer Erde nichts als eine leuchtende Kugel mit einigen dunklen Flecken, welche das deutungslustige Gemüt des Volkes zur Fabel vom Manne im Monde verarbeitete — heute haben wir von dem uns zugewandten Teile seiner Oberfläche sehr genaue Karten (Abb. 501 u. 502). Statt der elf Planeten, welche vor vierzig Jahren noch in der Schule gelehrt wurden, kennt man jetzt weit mehr als dreihundert, so daß die mythologischen Namen zu ihrer Bezeichnung nicht ausreichen, und man zu Buchstaben und Zahlen seine Zuflucht nehmen muß. Ein ganzes Heer solch kleiner Wandelsterne schwebt zwischen den Bahnen des Mars und des Jupiter, und trotzdem viele dreimal so weit von der Sonne entfernt sind als die Erde, und der Durchmesser der kleinsten kaum zehn Meilen beträgt, sind sie von der immer stärker werdenden Kraft der Fernrohre entdeckt, die Elemente ihrer Bewegung auf das genaueste gemessen und ihre Massen und Dichtigkeiten berechnet worden. — Es würde den uns gebotenen Raum weit überschreiten, wenn wir uns in die Einzelheiten astronomischer Beobachtungen verlieren wollten; erwünscht aber wird es jedenfalls sein, durch einige Abbildungen zu zeigen, wie einzelne Teile des Makrokosmus dem bewaffneten

Auge erscheinen, und welche Ansichten von dem Weltall wir im Gegensatze zu unseren Vorfahren gewonnen haben.

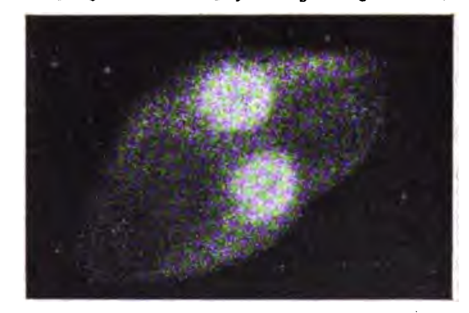
Wenn wir bei ab- oder zunehmendem Monde die beleuchtete Sichel mit einem guten Fernrohre betrachten, so werden wir verwundert über die Pracht des Anblickes sein. Der stark beleuchtete äußere Rand des Mondes geht nach innen zu in immer matter beleuchtete Partien über; wir erkennen, daß wir keine flache Scheibe, sondern einen kugelförmigen Körper vor uns haben, der von einer Seite her sein Licht empfängt, mit dem größten Teile aber für uns im Schatten liegt. Das beleuchtete Stück aber macht nicht den Eindruck einer gleichmäßigen Fläche: wir sehen darauf helle und dunkle Stellen, große ebene Flecken von minder hellem Glanze, daneben wieder durch besonders lebhaftes Licht hervortretende scharfe ringförmige Zeichnungen im Innern mit dunkel beschatteten Partien, und



506. Nebelfleck im Sternbild der Andromeda.



507. Ringnebel in der Leyer (in großen Fernrohren).



508. Dumbbells Nebel im Fuchs.

nach dem Zentrum der Mondsichel hin zeigen sich diese Lichtringe und einzelnen Lichtpunkte von immer kräftigerem Kontrast. Es gehört keine Phantasie dazu, um den merkwürdigen Anblick dahin zu deuten, daß wir einen Weltkörper von mannigfach gestalteter Oberfläche vor uns haben. Es werden in uns augenblicklich die Erinnerungen an jene Eindrücke wachgerufen, welche wir bei Sonnenaufgang angesichts hoher Gebirge gehabt haben. Wir sehen die hellerleuchteten Gipfel sich von den noch im Dunkel der Nacht begrabenen und beschatteten Gründen strahlend abheben, so daß sie förmlich isoliert erscheinen, und finden in den von der Sonne abgewendeten, besonders dunklen Stellen hinter den Lichtringen des Mondes die tiefen Schatten wieder, welche hoch aufragende Massen in die Niederungen zurückwerfen. Wir sehen in große Kessel hinab, die von hohen, steilen Wällen umgeben, uns an geplatzte und während des Platzens erstarrte Blasen erinnern. Wir unterscheiden die höheren Erhebungen von den niedrigen durch die Länge ihrer Schatten, und sehen aus der schon im völligen Dunkel liegenden Scheibe die höchsten

Kuppen noch als einzelne hell leuchtende Punkte auftauchen. Galilei schon hat die Schattenlänge als einen Maßstab für die Höhen der verschiedenen Gebirge — denn Gebirge, und zwar vulkanische Gebirge, erloschene Krater sind die ringförmigen Wälle — angegeben und selbst die Größen der Erhebung berechnet; und durch wiederholte Messungen hat man jetzt die Höhe einzelner Mondberge, wie die des Calippus (5050 m) oder die des Huyghens (4760 m), mit einer wahrscheinlichen Genauigkeit bestimmt, welche derjenigen von irdischen Höhenmessungen nahekommt.

Während Abb. 501 ein Stück der Mondsichel zeigt, gibt uns Abb. 502 die Ansicht einer mit Hilfe eines stärker vergrößernden Fernrohres aufgenommenen Mondlandschaft.

Den eigentümlich gebildeten Saturn haben wir unseren Lesern schon früher im Bilde



509. Die Scheibe des Jupiter im Teleskop.

vorgeführt. Abb. 509 gibt die Ansicht, welche der Jupiter in einem stark vergrößernden Fernrohre gewährt. Wir sehen den Planeten, der unserem unbewaffneten Auge am Himmel nur als ein leuchtender Punkt erscheint, mit zonenartig gelagerten Wolken überzogen, deren besondere Gestalt nach gewisser Zeit wiederkehrt und auf eine Umdrehung des Sternes um seine Achse hinweist. Nach genauen Beobachtungen derselben beträgt ein Jupitertag 9 Stunden 55 Minuten 26 Sekunden unserer Zeit. Wir vermögen die der Abplattung unserer Erde ähnliche Abplattung der Jupiterkugel an ihren Polen zu erkennen und zu messen. Die Monde sehen wir um ihren Planeten kreisen, und unsere Abbildung zeigt uns den dunklen, kreisförmigen Schatten, den der auf der linken Seite vor dem Jupiter stehende Mond auf dessen beleuchtete Scheibe wirft. Aus der Thatsache, daß dieser Schatten tief schwarz ist, folgern wir, daß der Jupiter selbst kein eigenes Licht besitzt, während der Umstand, daß die Monde selbst bisweilen als heller glänzende,

bisweilen als dunklere Punkte sich auf der Scheibe ihres Planeten abheben, und daß ihr Schatten oft größer erscheint als sie selbst, die Annahme von einer atmosphärischen Umhüllung des Jupiter wahrscheinlich macht.

Bei allen Gestirnen unseres Sonnensystems können wir die körperliche Gestalt wahrnehmen, aber selbst die vieltausendfach vergrößernden Fernrohre sind nicht im stande, die Fixsterne anders denn als leuchtende Punkte, ohne scheinbaren Durchmesser, erkennen zu lassen. Und wenn wir einen jener blassen Lichtnebel betrachten und immer stärkere und stärkere Ferngläser darauf richten, so können wir doch nur immer neue und immer mehr einzelne Lichtpunkte daraus sondern, deren jeder aber eine Sonne, eine Welt für sich ist. Ihre Gesamtheit aber eröffnet, wenn wir sie in Vergleich mit bekannten Kräftewirkungen bringen wollen, unseren Vorstellungen ein Gebiet von Aktionen, so gewaltig, daß nur die Überzeugung von der Existenz strenger Gesetzmäßigkeit unseren Gedanken Sammlung und eine feste Basis geben kann.

Betrachten wir die verschiedenen, in den Abb. 503—508 dargestellten Nebel! Welche Ideen von sich bildenden Welten, von Massenanziehung, von Rotationswirkungen steigen in uns auf! Dürfen wir diese Formbildungen mit der des Saturn vergleichen, oder ist nicht noch das Sonnensystem, welchem wir angehören, ein Stäubchen gegen jene Massen von Welten? — und dennoch müssen wir, durch jene unermeßlichen Räume die Äußerungen von Kräften als zusammenhaltend, ordnend und gestaltend annehmen, welche die kleinsten, an der Grenze des Verschwindens stehenden Atome an einander zieht.

Das Mikroskop.

Das einfache Mikroskop. Brillen und Vergrößerungsgläser. Das Sonnenmikroskop. Das zusammengesetzte Mikroskop. Chevaliers Mikroskop und das Mikroskop für mehrere Beobachter. Geschichtliches über die Erfindung und ihre Vervollkommnung. Zacharias Jansen und Galilei. Gebrauch des Mikroskopes. Was man damit sieht.

Nach zwei ganz entgegengesetzten Richtungen hin sind uns die Linsen zu Schlüsseln der Natur geworden. Das Teleskop führt uns in weit entfernte Welten durch den unendlichen Raum. Das Mikroskop enthüllt uns im Engsten, Kleinsten dieselben Gesetze, zeigt uns das Walten derselben Kräfte, die das Universum zusammenhalten, wunderbare Formen, die das Geheimnis der Harmonie bis zum Atome verfolgen lassen, wie es dem begeisterten Kepler in den Himmelssphären sich offenbarte.

Um uns herum zwei Welten — eine unendlich große und eine unendlich kleine, und wir an der Grenze zwischen beiden! Aber verlangend sucht der Geist jenseit der Grenzen zu forschen und schlägt Brücken durch die Luft, die er überschreitet, um Geahntes und Ungeahntes in der Nähe zu schauen. Und Teleskop und Mikroskop sind zwei solche Brücken — Wege durch Gefilde voll neuer und ewig wechselnder Reize, welche den beglückten Wanderer in unabsehbare Fernen führen, aus denen ihm kein versteinerndes Halt entgegenschallt.

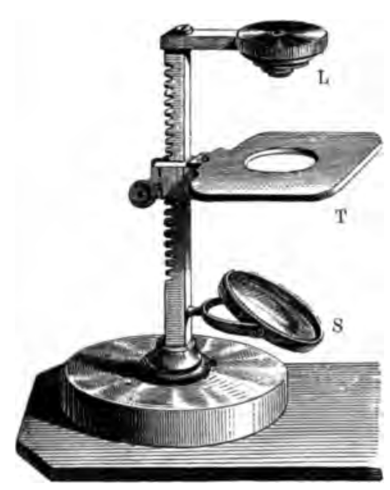
Wo heute ein Horizont unserer Erkenntnis Schranken setzt, darüber schreitet morgen der Mensch an der Seite Minervens, der Göttin fruchtbringender Wissenschaft. Sie lehrt das Gesetz zugleich mit seiner nützlichen Anwendung, und dieselbe Hand, welche dem Forscher die Bahn zeigt, schmiedet den kunstreichen Schild in der Esse des Vulkan. Man kann nicht abwägen und auseinanderhalten, wieviel wir den mechanischen Künsten, wieviel der wissenschaftlichen Erkenntnis bei der Herstellung von Teleskop und Mikroskop verdanken. Hier ging und geht die Technik Hand in Hand mit der Wissenschaft, und die Weisheit erwächst aus der Kunst.

Der Zeit nach ist die Erfindung des Mikroskopes eine viel ältere als die des Fernrohres, aber erst in den letzten drittehalb Jahrhunderten sind gewisse längst bekannte Erscheinungen der Vergrößerung für höhere wissenschaftliche Zwecke verwertet worden. Und wenn wir die mit Hilfe des Mikroskops auf dem Gebiete der organischen Natur gemachten Entdeckungen im Vergleich mit denen betrachten, die wir der Anwendung des Teleskopes verdanken, so können wir schwer entscheiden, ob nicht das Mikroskop uns im praktischen

Leben um vieles wichtiger ist, als das Fernrohr. Während dieses im Grunde doch nur die Bestätigung schon erkannter oder aus irdischen Verhältnissen abzuleitender Gesetze brachte, führte jenes den Forscher in eine neue Welt, in die geheime Werkstatt der Natur, in die Welt der organischen Veränderungen, wenn auch nicht des Entstehens, so doch des Werdens und Wachsens.

Das einfache Mikroskop. Die gewöhnliche Konvexlinse ist insofern schon ein Mikroskop, weil sie ein Objekt größer erscheinen läßt, als es in Wirklichkeit ist. Die früheren Hilfsmittel der Vergrößerung beschränkten sich auch lediglich auf dies einfache Instrument, welches, aus Glas geschliffen, in eine Fassung von Horn oder Messing gebracht und Lupe genannt wurde. Je größer die Krümmung der Linse ist, um so bedeutender ist ihre vergrößernde Kraft, und in den sogenannten Glastropfen oder Vogelaugen benutzt man als Vergrößerungsgläser geradezu kleine kugelförmige Glaskörperchen.

Obwohl schon Seneca der Wahrnehmung gedenkt, daß man durch hohle, mit Wasser gefüllte Kugeln die dahinter befindlichen Gegenstände größer und deutlicher sieht, und obwohl eine Anzahl anderer Nachweise aus dem Altertume vorhanden sind, daß man die vergrößernde Kraft sphärischer Glaskörper oft beobachtet hatte, scheint doch eine bewußte Anwendung von dieser Erscheinung erst ziemlich spät gemacht worden zu sein. Die merkwürdig feinen und zierlichen Arbeiten alter griechischer Steinschneider könnten uns zwar veranlassen, anzunehmen, daß sie mit Hilfe von Vergrößerungsgläsern ausgeführt worden seien. Allein wir finden im ganzen Altertume keine Belege dafür; denn die ausgegrabenen Linsen können ebenso gut ausschließlich als Brenngläser gedient haben, da die vestalischen Jungfrauen das heilige Feuer, wenn es verlöscht war, nur durch das Sonnenlicht wieder entzünden durften. Der Araber Alhazen, um die Mitte des 11. Jahrhunderts, war wohl der erste, welcher eigentliche Linsen aus Kugelsegmenten als Vergrößerungsgläser anwandte. Merkwürdig aber bleibt, daß an diesen Fortschritt sich keine weiteren Erfolge knüpften. Dies kam wohl hauptsächlich daher, daß Alhazen und auch Spätere noch ihre Gläser direkt auf die Buchstaben der Schrift legten, welche sie vergrößert sehen wollten, während es ihnen vollständig entgangen zu sein scheint, daß ein bei weitem günstigerer Erfolg erzielt wird, wenn man die Linsen etwas entfernt von dem zu beobachtenden Gegenstand vor das Auge hält.

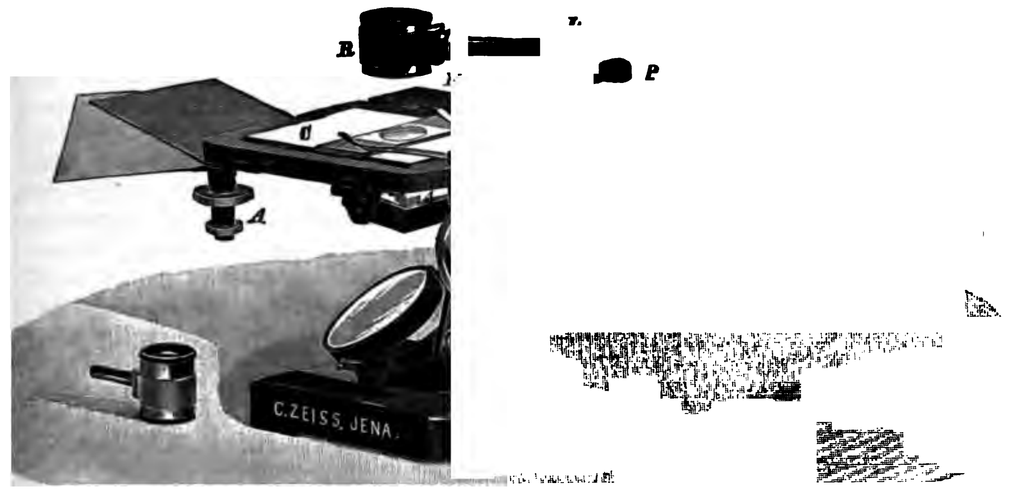


510. Einfaches Mikroskop.

Mit der Erfindung der Brillen aber im 13. Jahrhundert wurde die Linsenschleiferei zu einem Gewerbe, welches sich rasch über alle Länder ausbreitete, und es war ganz natürlich, daß mit den nun vielseitig verbreiteten Gläsern Versuche absichtlich oder unabsichtlich gemacht wurden, welche zu Verbesserungen der Lupen führten. Man gab den Gläsern größere Krümmungen und kombinierte zwei oder drei Linsen derart, daß sie in derselben Weise wirkten, indem sie die Strahlen immer mehr konvergierend machten. Dergleichen Linsenkombinationen nennt man einfache Mikroskope. Sie erhalten gewöhnlich eine Metallfassung und werden zu zwei, drei oder mehr beweglich an einem Stativ angebracht, damit man ihre Wirkung, einzeln oder mit einander kombiniert, beliebig zu benutzen vermag. Die Vergrößerung solcher Instrumente kann ziemlich weit getrieben werden. Man hat Linsen geschliffen, welche eine dreihundertfache Linearvergrößerung ergaben, ja man will Glastropfen hergestellt haben, welche die Vergrößerung auf das Achthundertfache steigern sollten. Damit war aber der Übelstand verknüpft, daß mit der Zunahme der Vergrößerung das Gesichtsfeld sich verkleinerte. Was man jedoch zur Verbesserung der kleinen Instrumente thun konnte, geschah, und so wurden sie bald zu einer Vollkommenheit gebracht, welche ihre Verwendung zu wissenschaftlichen Zwecken

gestattete. Die ersten Apparate waren allerdings mehr Kuriositäten, sogenannte Floh- und Mückengläser, und es wird erzählt, daß der seiner Zeit hochberühmte Naturkundige Scheiner, als er auf einer Reise in einem Tiroler Dorfe gestorben war, noch einen großen Aufruhr unter Bauern und Geistlichkeit hervorrief. Man hatte nämlich in seinem Nachlasse ein merkwürdiges Glas gefunden. Als einer der Bauern aus Neugierde in dasselbe hineinsah, erblickte er eine so schrecklich große und fürchterlich gebildete Gestalt vor seinen Augen, daß er, überzeugt, den Teufel gesehen zu haben, das Glas voller Furcht wegwarf. Ein anderer hob es auf und sah das Nämliche. Natürlich galt nun Scheiner für einen argen Zauberer und Hexenmeister, der den Teufel, in ein Glas gebannt, mit auf Reisen nahm. Ein ehrliches Begräbnis sollte ihm versagt werden; aber als man eben noch über die Art verhandelte, wie man sich der unbequemen Leiche entledigen sollte, wurde das Glas geöffnet, und der vermeintliche Teufel erwies sich als ein veritabler Floh, der, durch das linsenförmige Deckelglas angesehen, ungewöhnlich vergrößert erschien.

Dienten nun früher diese Instrumente, die übrigens auch heute noch auf Jahrmärkten feilgeboten werden, meist nur zur Belustigung, so finden wir dagegen Leeuwen-

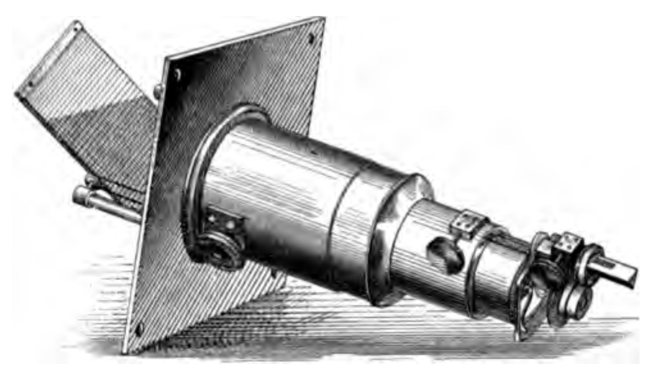


511. Präpariermikroskop.

hoek (1632—1723) schon eifrig beschäftigt, mit selbstgebauten Apparaten den inneren Bau von Pflanzen und Tieren zu studieren, und seine vortrefflichen, nach der Natur gezeichneten Abbildungen sind der beste Beweis für die Vervollkommnung, welche er seinen Instrumenten zu geben verstanden hatte (Abb. 510). Er hatte die Linsen L an einem vertikalen Stativ befestigt und unter ihnen einen kleinen Objekttisch T angebracht, den er mittels Trieb und Zahnstange auf- und abwärts bewegen und in den Brennpunkt des Linsensystems einstellen konnte. Außerdem wandte er schon als Beleuchtungsapparat einen Hohlspiegel S an, um durch das von ihm reflektierte Licht die auf dem Tischchen befindlichen Objekte von unten besser beleuchten zu können. Diese Anordnung ist von späteren Forschern (Muschenbroek, Hooke u. s. w.) teils beibehalten, teils mannigfach verändert und verbessert worden.

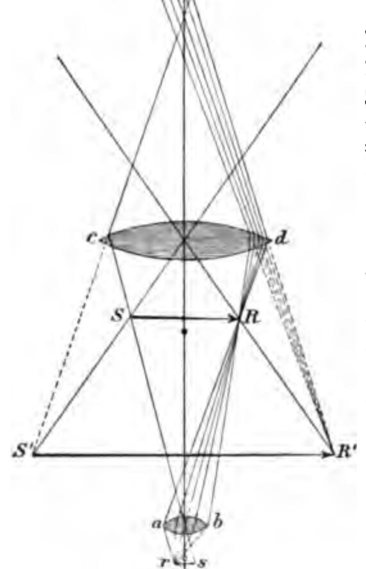
Abb. 511 zeigt ein gutes einfaches, von Zeiß in Jena konstruiertes Mikroskop, wie es von Zoologen und Botanikern zum Präparieren angewandt wird. Der Tisch wird gebildet durch einen Metallrahmen, an welchem bequem zusammenlegbare hölzerne Becken zum Auflegen der Hände angesetzt werden. Die aus drei verkitteten Linsen bestehende aplanatische Lupe, welche relativ große Fokalabstände bei großem planen Sehfeld gewährt, kann mittels eines besonderen, bei L in den Systemträger einzusteckenden Armes L R über den ganzen Objekttisch fortbewegt werden.

Das Sonnenmikroskop steht bezüglich seiner Einrichtung zwischen dem einfachen und dem zusammengesetzten Mikroskop. Durch die gewöhnliche Lupe werden nur die von dem beobachteten Objekt ausgehenden Strahlen unter größerer Konvergenz in das Auge geleitet; durch das Sonnenmikroskop wird ein reelles Bild des Objektes erzeugt, welches, in geeigneter Entfernung aufgefangen, das Objekt zwar verkehrt, aber bedeutend vergrößert wiedergibt; bei dem zusammengesetzten Mikroskop wird ein im Innern des Rohres erzeugtes reelles Bild noch durch ein besonderes Okular, wie im Fernrohr, betrachtet.



512. Sonnenmikroskop.

Das Sonnenmikroskop ist ganz nach dem Prinzip der Zauberlaterne eingerichtet; an Stelle der Glasgemälde wird der zwischen zwei Glasplatten befindliche, zu vergrößernde Gegenstand eingeschoben. Die Beleuchtung geschieht, wie schon der Name des Instrumentes andeutet, durch direktes Sonnenlicht, das mittels eines Heliostaten einer Sammellinse zugeworfen und von dieser auf das Objekt konzentriert wird. In Ermangelung von Sonnenlicht kann auch elektrisches Licht, Zirkonlicht, Drummondsches Kalklicht oder eine ähnliche intensive Lichtquelle benutzt werden. Angewandt wird das Sonnenmikroskop weniger für rein wissenschaftliche Untersuchungen als für allgemeine Schaustellungen, bei denen es darauf ankommt, gewisse, dem unbewaffneten Auge unsichtbare Gegenstände, z. B. Blumenstaub, Schmetterlingsstaub, Kieselpanzer der Kreide, Krystallbildungen u. s. w., mehr im großen Ganzen auf überraschende Weise vergrößert vorzuführen, als einen klaren Einblick in die Beschaffenheit der kleinsten Einzelheiten dem Zuschauer zu verschaffen.

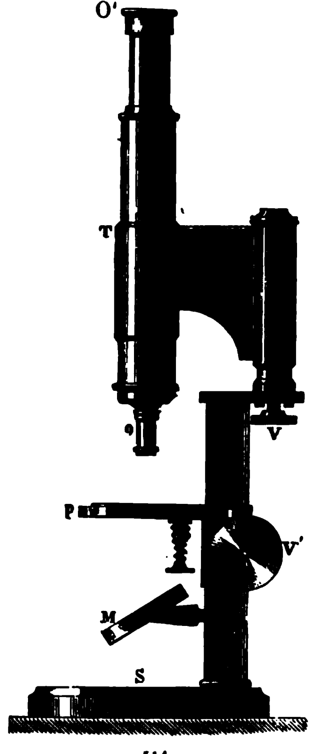


513. Prinzip des zusammengesetzten Mikroskops.

In Abb. 512 ist ein Sonnenmikroskop in Verbindung mit einem Heliostatenspiegel zum Anschrauben an einen Laden des Beobachtungsraumes dargestellt. Wenn man auch von einer eigentlichen Erfindung des Sonnenmikroskopes insofern nicht wohl reden kann, als seine Einrichtung durch die der älteren Zauberlaterne bereits nahe gelegt war, und in der Benutzung von Sonnenlicht anstatt Lampenlicht keine wesentliche Neuerung erblickt werden kann, so pflegt man die Erfindung doch gewöhnlich dem Amsterdamer Lieberkühn zuzuschreiben. Er soll das Sonnenmikroskop durch Fahrenheit, der im Jahre 1736 starb, kennen gelernt und durch seine ebenso überraschenden, wie anregenden objektiven Darstellungen mittels desselben das Interesse für mikroskopische Untersuchungen von neuem erweckt und außerordentlich gefördert haben.

Das zusammengesetzte Mikroskop. Es scheint merkwürdig, daß das zusammengesetzte Mikroskop, trotzdem seine Erfindung ebenso alt ist wie die des einfachen mit kombinierten Linsen, so lange Zeit in der Vervollkommnung hinter diesem zurückblieb, so daß bis zu Anfang dieses Jahrhunderts fast alle wissenschaftlichen mikroskopischen Untersuchungen mit dem einfachen Mikroskope gemacht worden sind. Der Grund, warum man dem allerdings auf eine hohe Stufe der Vollkommenheit gebrachten einfachen

Mikroskope den Vorzug gab, lag darin, daß die Bilder des zusammengesetzten Mikroskopes infolge der chromatischen Aberration undeutliche farbige Ränder zeigten, solange man noch nicht gelernt hatte, gute achromatische Linsensysteme herzustellen. Als man dies Problem gelöst hatte, wandte man sich mit allem Eifer der Verbesserung des zusammengesetzten Mikroskops zu, welches nun die Vorzüge in sich vereinigte, ein großes Gesichtsfeld, starke Vergrößerung und scharfe Bilder mit farblosen Rändern zu liefern. Das zusammengesetzte Mikroskop unterscheidet sich, wie schon erwähnt, von dem einfachen dadurch, daß es zwei Systeme von Gläsern, ein Objektiv und ein Okular, enthält; durch das Objektiv wird ein vergrößertes, umgekehrtes, reelles Bild von dem beobachteten Gegenstande entworfen, und dieses wird durch das vergrößernde Okular betrachtet. Wir brauchen uns nur der Einrichtung des Fernrohres zu erinnern, um aus Abb. 513 sofort die Wirkungsweise erkennen zu können. r s ist das zu beobachtende kleine Objekt, welches sich nahe beim Brennpunkte des Objektivs ab befindet; dieses erzeugt von dem Objekte das vergrößerte, umgekehrte Bild R S, welches durch das vergrößernde Okular c d betrachtet in R' S' erscheint.



514. Zusammengesetztes Mikroskop.

Dies ist das Grundprinzip aller zusammengesetzten Mikroskope. Was auch die einzelnen Optiker für Abweichungen in der äußeren Herstellung ihrer Instrumente anbringen, die Anordnung der Linsen bleibt bei allen im Prinzip dieselbe. Die Zahl der Linsen ist freilich oft eine viel größere als in unserer Zeichnung, anstatt einer bikonvexen Linse wendet man Kombinationen von plankonvexen, als Okular gewöhnlich das Campanische an (Abb. 488); die vom Objektiv kommenden Strahlen treffen, ehe sie sich zu einem reellen Bilde vereinigen, die Kollektivlinse des Okulars, werden durch diese konvergenter gemacht, und das durch sie erzeugte Bild wird durch die Okularlinse betrachtet. Das Objektiv ist gleichfalls in der Regel aus mehreren Linsen zusammengesetzt; durch verschiedene Kombinationen derselben erhält man verschiedene Grade der Vergrößerung. Außerdem wird die Anzahl der Linsen dadurch vermehrt, daß man bei besseren Instrumenten ausschließlich achromatische Gläser verwendet. Das Gesichtsfeld des Mikroskops hängt von dem Durchmesser des Okulars ab und wird durch den Winkel gemessen, unter welchem von der Mitte des Objektivs aus das Okular erscheint.



515. Chevaliers Mikroskop.

Abb. 514 stellt eine der gewöhnlichen Ausführungen dar, wie sie dem zusammengesetzten Mikroskope gegeben wird. Der Tubus T trägt die Hauptbestandteile desselben, das Okular O' und das Objektivsystem O. Der Tubus, welcher innen geschwärzt und an geeigneten Stellen mit Blenden versehen ist, läßt sich mit Hilfe der Mikrometerschraube V längs des vertikalen Statives auf und ab bewegen, um eine scharfe und genaue Einstellung auf das Objekt zu erreichen.

Die rohere Einstellung kann vorher durch Verschieben des Tubus in der ihn umschließenden Hülse T bewerkstelligt werden. Der auf der prismatischen Säule ruhende

Objektträger P läßt sich mittels des Zahngetriebes V' vertikal auf und ab bewegen. Der Objektträger selbst ist ein kleiner Tisch, welcher in der Mitte durchbrochen ist, um das Objekt mittels des von dem verstellbaren Hohlspiegel M reflektierten Lichtes von unten beleuchten zu können. Um nach Bedürfnis mehr oder weniger Licht zuzuführen, dient eine mit verschieden großen Öffnungen versehene, unter dem Tische befindliche Blende. Undurchsichtige Gegenstände beleuchtet man von oben durch eine Sammellinse.

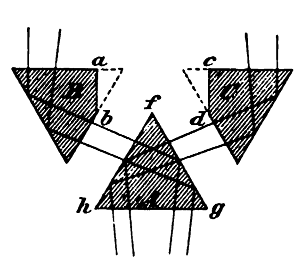
Chevalier hat eine Konstruktion angegeben, bei welcher durch Vermittelung eines im Tubus befindlichen Reversionsprismas die Beobachtung durch das Okular in horizontaler Richtung erfolgen kann (Abb. 515).

Durch Einschaltung eines eigentümlich geschliffenen Prismas läßt sich erreichen, daß mehrere Beobachter zu gleicher Zeit mit demselben Instrumente dasselbe Objekt beobachten können. Dieses Prisma ist, wie bei dem Chevalierschen Mikroskop, über dem Objektivlinsensystem angebracht; jeder Beobachter hat natürlich sein eignes Okular (Abb. 516). Für die Diskussion der Beobachtung bei gemeinschaftlichen Untersuchungen, namentlich aber auch für Unterrichtszwecke hat diese Anordnung zweifelsohne ihre Vorzüge, denn es gehört zur verständnisvollen Beobachtung mikroskopischer Objekte eine große Übung, die wohl durch Selbststudium, bequemer aber durch Unterweisung gewonnen werden kann; und letztere wird wesentlich erleichtert bei gleichzeitiger Betrachtung seitens mehrerer Beobachter.


516. Nachets stereoskopisches binokulares Mikroskop.

Binokulare Mikroskope für nur einen Beobachter ermöglichen es, das Objekt gleichzeitig mit beiden Augen zu beobachten, um einen stereoskopischen Effekt zu erzielen. Abb. 516 gibt eine Ansicht von Nachets stereoskopischem binokularen Mikroskop. Zwischen dem Objektiv und den beiden parallelen Tuben sind die total reflektierenden Prismen angebracht, deren Querschnitt und Wirkungsweise Abb. 517 veranschaulicht. Die von dem Objektiv kommenden Strahlen werden durch die Prismenflächen gf und hf des Prismas A geteilt nach den Prismen B und C hin reflektiert, von denen aus sie durch eine zweite totale Reflexion in die Okularrohre und in das Auge gelangen. Bei dem durch Abb. 518 in der Ansicht und durch Abb. 519 im Querschnitt dargestellten Wenhamschen Binokularmikroskop gelangt ein Teil der vom Objektiv kommenden Strahlen direkt in das Rohr CD und ins Auge, während der andere Teil durch zweimalige Reflexion an dem kleinen Glasprisma A durch den Tubus BE in das andere Auge geleitet wird. Abb. 520 stellt ein quadriokulares Mikroskop nach Harting für vier Beobachter dar.

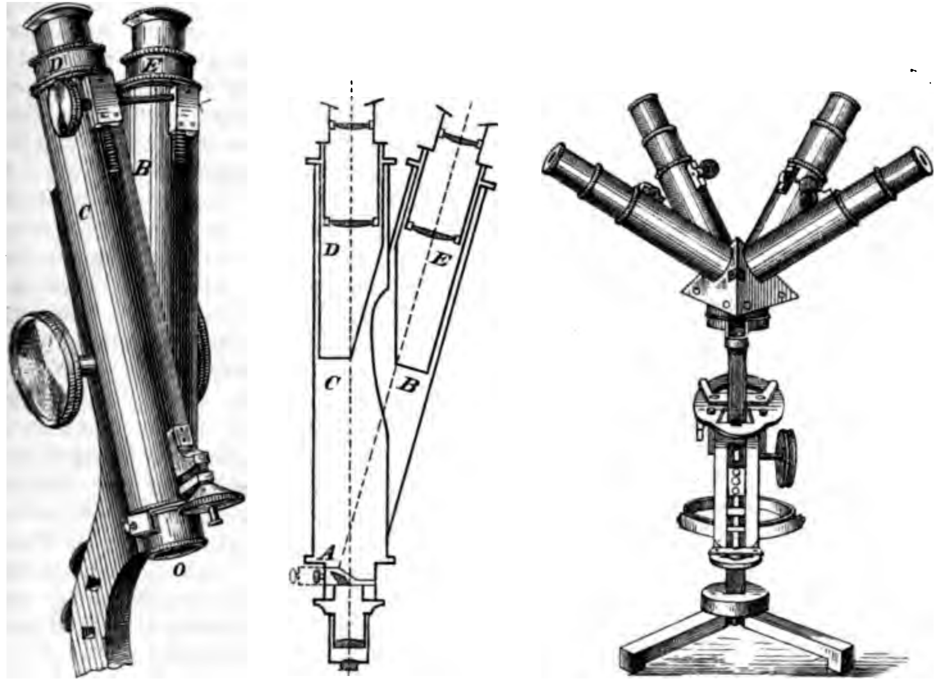
Berühmte ältere Werkstätten für Mikroskope sind die von Hartnack in Potsdam, Schieck in Berlin, Chevalier in Paris, Plößl in Wien, Merz in München; von neueren Firmen wären zu nennen Schmidt und Haensch in Berlin, Schroeder in Hamburg, vor allen aber C. Zeiß in Jena, der gegenwärtig wohl die vorzüglichsten Instrumente liefert.



517. Querschnitt der Prismen zu Nachets Mikroskop.

In Abb. 521 ist ein ausgezeichnetes, für die meisten Spezialarbeiten auf mikroskopischem Gebiete ausreichendes Instrument von C. Zeiß in Jena dargestellt. Der obere Teil, bis zur Horizontalstellung des Tubus umlegbar, kann durch Anziehen des seitlich unten angebrachten Hebels auch in jeder Zwischenlage fixiert werden. Die gröbere Einstellung erfolgt mittels Trieb und Zahnstange, die feinere Einstellung mittels der mit geteiltem Kopf versehenen Mikrometerschraube. Zur Beleuchtung des Objektes von unten dient der unterhalb des Objekttisches befindliche Beleuchtungsapparat nach Abbe, der im wesentlichen aus einem

Kondensorsystem von kurzem Fokus besteht, welches die von dem Plan- oder Hohlspiegel ausgehenden Lichtstrahlen in einen Strahlenkegel von sehr großer Apertur sammelt und im Objekt vereinigt. Die volle Öffnung des Beleuchtungskegels ist nur für die Beobachtung feinkörniger, stark tingierter Objekte (z. B. Bakterien) mit Objektiven von großer Apertur zu verwenden, während sonst der Beleuchtungskegel entsprechend reduziert werden muß, was durch Anwendung von Blendungen, resp. der Irisblendung geschieht — zentrale Beleuchtung. Durch Exzentrischstellen der Blendung mittels des am Blendungsträger angebrachten Zahn- und Triebwerks können die zentralen Strahlen von der Wirkung auf das Objekt ausgeschlossen und ein Teil der außeraxialen Strahlen des Beleuchtungskegels zur Wirkung gebracht werden — schiefe Beleuchtung. In Abb. 522 und 523 ist ein ausklappbarer Abbescher Kondensor, welcher in die Schiebhülse des Beleuchtungsapparats eingeschoben werden kann, dargestellt. Er kann nach Beiseiteschlagen



518. Wenhams Binokularmikroskop. 519. Wenhams Binokularmikroskop (Querschnitt). 520. Mikroskop für vier Beobachter nach Harting.

des Blendungsträgers D (vom Beobachter nach rechts) mit Hilfe des Hebelchens H aus seiner Hülse um die Achse Q (nach unten) herausgeklappt und dann weiter um die Achse Z (nach links) bei Seite geführt werden. Bei der Beobachtung ohne Kondensor kann eine Abstufung des Beleuchtungskegels mittels der mit dem Apparate fest verbundenen Irisblendung mit Hilfe des Knopfes K bewirkt werden (Abb. 522); diese ist derartig gestaltet, daß der Rand der Blendungsöffnung nach möglichst weitgehender Einengung derselben dicht unter das Präparat zu liegen kommt.

Zur genauen Messung größerer Objekte, welche nicht in einem Sehfelde des Mikroskopes zu übersehen sind, kann auf dem Objekttisch das Schraubenmikrometer (Abb. 524) befestigt werden. Der mittels der Mikrometerschraube zu bewegende Schlitten trägt eine drehbare Scheibe mit Kreisteilung zur Orientierung des Objekts. Die Teilung der Schraubentrommel gibt direkt 0,002 mm an; die ganzen Umdrehungen der Schraube werden durch einen Zeiger gezählt.

Die Entwickelungsgeschichte des Mikroskops fällt, wie wir schon erwähnt haben, in ihren ersten Ursprüngen mit der Zeit der Erfindung der Brillengläser zu-

sammen, welche weit in das Altertum zurückreicht. Wenn der bekannte Smaragd des Nero wirklich ein Sehglas war, so würde dieser Umstand darauf hindeuten, daß man damals bereits mit der Herstellung und Wirkungsweise konkaver Linsen vertraut war; denn Nero wird uns von einigen seiner zeitgenössischen Schriftsteller als kurzsichtig geschildert. Indessen finden wir bei Roger Baco (gestorben 1294) nur konvexe Linsen erwähnt und alten Leuten, welche an Fernsichtigkeit zu leiden pflegen, anempfohlen. Die Erfindung der Brillen (von Beryllium, das mi Mittelalter gleichbedeutend mit Glas war) ist vor Bacos Zeit zu setzen; wahrscheinlich ist sie am Ende des 13. Jahrhunderts durch Armati von Florenz gemacht und durch Alexander von Spina weiter verbreitet worden. Die erste authentische Nachricht — „die neulich erfundenen Gläser, Brillen genannt, ein wahrer Segen für arme Greise mit schwachem Gesicht“ — stammt aus dem Jahre 1299. Eine so heilsame Erfindung mußte sich rasch in allen Ländern verbreiten; zu Anfang des 14. Jahrhunderts waren, wie Humboldt in seinem „Kosmos“ anführt, die Brillen zu Haarlem bekannt. Freilich mögen diese alten, mit Sohlleder gefaßten Brillen ihren eleganten modernen Geschwistern recht wenig ähnlich gewesen sein. Der große Bedarf rief eine neue Industrie, die Brillenschleiferei, hervor, die bald in jeder nur einigermaßen bedeutenderen Stadt betrieben wurde; in Holland namentlich, wo damals ein besonders reges Leben herrschte, war die Kunst eine vielgeübte, und die kleine Stadt Middelburg hat durch sie in der Geschichte der Erfindungen einen Namen ersten Ranges erhalten.



521 Zeißsches Mikroskop mit beweglichem Objekttisch. (1/2 natürl. Größe.)

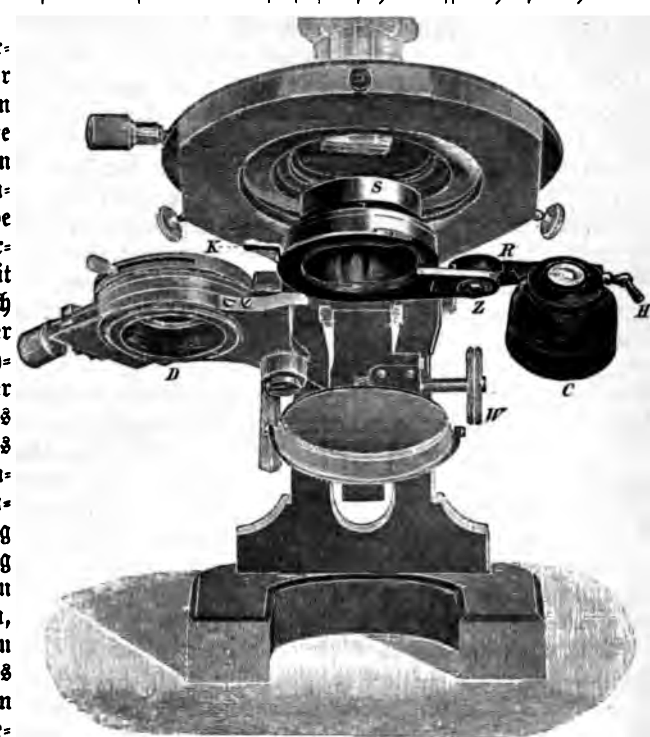
Nicht unerwähnt mag bleiben, daß die Brillenmacherei sich heute zu einer wichtigen Industrie ausgebildet hat, deren Hauptsitz in Deutschland seit alters Nürnberg-Fürth ist. An Stelle der alten Sohlenlederfassung trat 1710 die Drahtfassung, die ihrerseits bald darauf durch solche mit Messing ersetzt wurde. Im Jahre 1792 kamen Brillen mit versilberten Seitenspangen, 1801 solche mit Schildpatt- und Hornfassung, 1840 solche mit Argentanfassung auf. Die Stahlbrillen wurden zuerst in Frankreich verfertigt, und sie fanden rasch große Verbreitung; gegenwärtig ist ihre Fabrikation auch anderweitig eingeführt; Fürth z. B. bringt jährlich viele Hunderttausende von Stahlbrillen auf den Markt.



522. Ausklappbarer Abbescher Kondensor mit Irisblende.

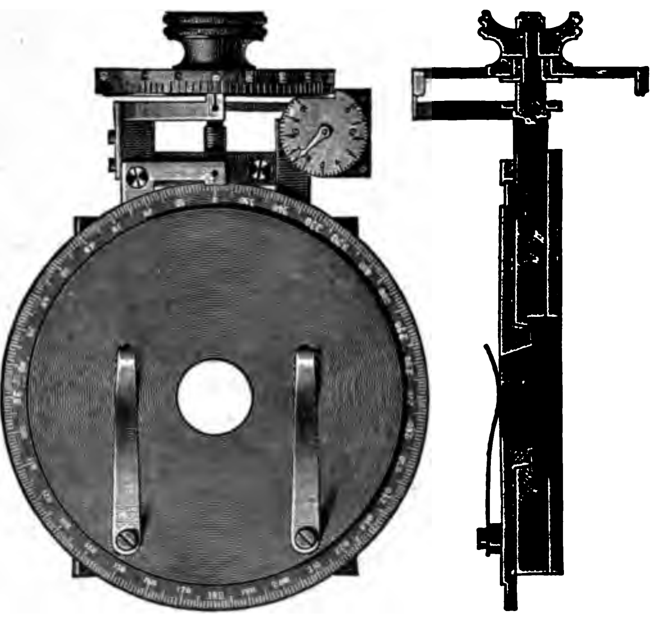
In dem Städtchen Middelburg aber wurde nicht nur das Fernrohr, sondern auch das Mikroskop in den Werkstätten dortiger Künstler erfunden. Man hat das Schicksal

der beiden Erfindungen oft mit einander verwechselt, und daher kommt es, daß wir denselben Prätendenten, welche die Priorität für das Teleskop für sich beanspruchen, auch beim Mikroskop wieder begegnen.



523. Ausklappbarer Kondensor verbunden mit dem Mikroskop.

Besonders aber sind Cornelius Drebbel aus Alkmar und Galilei, der eine von den Holländern, der andere von den Italienern, mit allen Ansprüchen der ersten Erfindung ausgerüstet worden, beide aber, wie die letzten Untersuchungen ergeben haben, mit Unrecht. Denn es hat sich herausgestellt, daß aus der Werkstatt des immer nur flüchtig erwähnten Middelburger Brillenmachers Jansen das erste Mikroskop zu Ende des 16. Jahrhunderts (wahrscheinlich schon 1590) hervorgegangen ist. Die bei Besprechung der historischen Entwickelung des Fernrohrs schon erwähnten gerichtlichen Nachforschungen, welche Willem Boreel, ein Spielkamerad von Zacharias Jansens Sohn Hans, anstellen ließ, um aus dem schon beginnenden Erfinderstreit seiner Vaterstadt Middelburg die Ehre zu retten, ergaben, daß lange vor der Erfindung Lippersheys in der Familie der Jansen ein zusammengesetztes optisches Glas erfunden worden war, welches damals, ebenso wie das Fernrohr, kurzweg Augenglas oder Brille genannt wird, seiner Beschreibung nach aber nichts anderes als ein zusammengesetztes Mikroskop war. Die Unbestimmtheit der Benennung ist denn auch die Ursache geworden, daß bald die beiden Jansen als Erfinder des Fernrohrs, bald Lippershey als erster Konstrukteur des Mikroskops angesehen wurde.


524. Objekt-Schraubenmikrometer. (2/3 natür. Größe.)

Ein solches, vielleicht das erste, überreichte Jansen dem Prinzen Moritz von Nassau und erhielt dafür eine Belohnung. Als Boreel 1619 in England als Gesandter war, sah er beim Hofmathematiker Cornelius Drebbel ein ebensolches Instrument, welches

dieser, wie er selbst sagte, zum Geschenk vom Erzherzog Albert erhalten hatte. Dieses Mikroskop bestand aus einer 1 cm weiten Röhre von vergoldetem Kupfer, getragen von drei messingenen Delphinen, welche auf einer Scheibe von Ebenholz befestigt waren, auf der sich zugleich die Vorrichtung zum Festhalten der zu betrachtenden Gegenstände befand. Nachweislich ist aber dem österreichischen Prinzen von Jansen ein Mikroskop überreicht worden, welches mit dem Drebbelschen Instrumente identisch ist. Bedenkt man nun, wie gern und wie häufig die Menge gesonnen ist, schon berühmten Männern bedeutende Eigenschaften und Erfindungen zuzuschreiben, nicht berühmte aber unbeachtet zu lassen, so nimmt es nicht wunder, wenn von der öffentlichen Meinung der bekannte, hochstehende Gelehrte Drebbel als Erfinder der Mikroskope gepriesen wird, die er nach dem Jansenschen Modelle anfertigte und unter seiner weitverbreiteten Bekanntschaft verteilte. Des einfachen Middelburger Brillenmachers gedachte niemand. Ein Verwandter Drebbels, Jakob Kuppler aus Köln, kam 1622 nach Rom, um das neue, wundervolle Instrument dem päpstlichen Hofe vorzuzeigen. Er starb jedoch, ehe er Gelegenheit gefunden hatte, das Mikroskop dort bekannt zu machen.

Von Paris aus wurden nun andere Mikroskope nach Rom gesandt, allein man verstand dort mit der neuen Erfindung so wenig umzugehen, daß es erst nach Galileis Ankunft gelang, die Objekte klar zu sehen. Nach dem Muster dieser Instrumente setzte höchstwahrscheinlich Galilei das Mikroskop zusammen, welches er 1624 an Bartholomeo Imperiali nach Genua sandte. Galilei soll zwar bereits im Jahre 1612 ein Mikroskop an den König Sigismund von Polen geschickt haben; nirgends ist aber erwähnt, von welcher Zusammensetzung und Wirkung der Apparat gewesen sei, und außerdem ist bis 1624 nur jenes Galileische Instrument bekannt. In diesem Jahre, heißt es, habe er das Mikroskop bedeutend verbessert und dann eine große Anzahl derselben hergestellt.

Aus alledem scheint hervorzugehen, daß ihm bezüglich dieser Erfindung und derjenigen des Fernrohrs kein anderer Ruhm gebührt, als der, dieselben vervollkommnet und deren Anwendung und Verbreitung vermittelt zu haben. Weiter aber gebührt Galilei allein das Verdienst, den Eifer angefacht zu haben, mit welchem die Gelehrten Italiens das neue Instrument bei ihren Forschungen verwandten, so daß durch den vielseitigen Gebrauch desselben Veranlassung zu mannigfachen Verbesserungen gegeben wurde. Francesco Stelluti hat schon 1625 den anatomischen Bau der Honigbiene mikroskopisch untersucht; Marcello Malpighi in Bologna wies die Zirkulation des Blutes in den Kapillargefäßen der Schwimmhaut des Frosches nach; der Optiker Divini setzte an Stelle einer bikonvexen Okularlinse zwei plankonvexe Linsen, die sich in der Mitte ihrer gekrümmten Oberfläche berührten, wodurch die sphärische Abweichung bedeutend verringert wurde; Campani erfand dann das nach ihm benannte Okular.

In England veröffentlichte Robert Hooke 1665 seine „Mikrographie“, Beobachtungen über die Struktur einzelner Teile des pflanzlichen und tierischen Körpers, die er mit selbstverfertigten Instrumenten gemacht hatte. Sein Mikroskop bestand aus einer vierteiligen, in einander zu schiebenden Röhre, in welcher sich Objektiv, Kollektiv und Okular befanden. Mittels einer Schraube konnte es dem zu beobachtenden Gegenstande allmählich genähert werden. Übrigens hatte schon Galilei seine Instrumente verschiebbar eingerichtet. Nach Hooke verdienen in der Geschichte mikroskopischer Untersuchungen die Engländer Henschaw und Nehemiah Grew genannt zu werden. In Deutschland hat sich um die Vervollkommnung der Mikroskope Sturm in Nürnberg besonders dadurch verdient gemacht, daß er zur Vermeidung der sphärischen und chromatischen Aberration und zur Erzielung möglichst scharfer Bilder zuerst das Objektiv aus einer Kombination von zwei bikonvexen oder von einer plankonvexen und einer bikonvexen Linse zusammenstellte. Er erreichte indes seinen Zweck nicht, da die genannten Mängel auch durch Huyghens' Vorschlag, nämlich Linsen von großer Brennweite zu verwenden, nur zum Teil beseitigt wurden. So kam es, daß die einfache Lupe sich behauptete, während das zusammengesetzte Mikroskop von wenigen Forschern und fast nur versuchsweise in Anwendung gebracht wurde.

Die Verbesserungen an der mechanischen Einrichtung des zusammengesetzten Mikroskops betrafen hauptsächlich den Objektträger und die Beleuchtungsvorrichtung. Der erste

wurde sehr bald nach Hookes Idee mit einer feinen Schraubeneinstellung versehen, während für die letztere Linsen und Spiegelvorrichtungen bald einzeln, bald mit einander kombiniert angewandt wurden. Maßgebend für die späteren Ausführungen wurde die Konstruktion, welche zuerst unser Landsmann Hertel anwandte. Er gab seinen Instrumenten einen Spiegel, der, nach allen Richtungen drehbar, jede mögliche Lage gegen das Objekt einnehmen konnte; der Objektträger hatte eine runde Öffnung für durchsichtige Gegenstände, für undurchsichtige eine weiße oder eine schwarze Platte. Der Tubus war in einem Scharnier beweglich und konnte sowohl Schrauben- als Glas- oder Fadenmikrometer behufs mikroskopischer Messungen aufnehmen.

Die Hertelschen Instrumente dienten ihrer ausgezeichneten Brauchbarkeit wegen späteren Optikern, wie Martin, Adams, Dollond, Reinthaler in Leipzig, Brander in Augsburg u. s. w., vielfach als Vorbilder, und ihre Einrichtung findet sich im großen und ganzen noch in den heutigen Mikroskopen wieder.

Man brachte damals auch bereits Sammlungen von mikroskopischen Objekten für Liebhaber naturwissenschaftlicher Unterhaltungen in den Handel.

Die Hauptbestandteile des Mikroskops aber, die Linsen, erhielten ihre Vervollkommnung erst in der Zeit nach Euler. Robert Barker und andere wollten, weil die noch nicht beseitigte Farbenzerstreuung die Deutlichkeit der Bilder beeinträchtigte, reflektierende Mikroskope, in denen, wie in den Spiegelteleskopen, das Objektiv durch einen Hohlspiegel ersetzt war, in Aufnahme bringen, aber die geringe Lichtstärke der Bilder vereitelte diese Bestrebungen. Dellabare versuchte durch eine eigentümliche Kombination seiner Okulare die sphärische Aberration zu verringern und durch Einschaltung einer Kollektivlinse das Gesichtsfeld zu vergrößern. Wie Sturm, wandte auch er verschiedene Objektive an, um verschiedene Vergrößerungen hervorzubringen, und machte zu diesem Zwecke seine Rohre verschiebbar. Dellabare selbst hat aber noch keine achromatische Doppellinse angewandt, obwohl er die beiden dazu geeigneten Glassorten, Crown- und Flintglas, gebrauchte, vielmehr hat dies zuerst Äpinus gethan, nach welchem dann die Holländer Beeldsnider, Jan und Herman van Deyl ausgezeichnete Mikroskope verfertigten. Die Instrumente von Äpinus litten aber immer noch an dem Mangel, Linsen von zu großer Brennweite zu besitzen, dadurch wurden sie ungewöhnlich lang und ihre Handhabung sehr unbequem. Die van Deylschen Objektive, deren gewöhnlich zwei zu einem Mikroskope gehörten, hatten dagegen nur eine Brennweite von 30 und von 15 mm, bestanden aus einer bikonvexen Crownglaslinse und einer fast plankonkaven Linse von Flintglas, und sollen nach Hartings Urteil so vortrefflich gewesen sein, daß sie selbst neuere Objektive übertrafen.

Es hat in der That lange gedauert, ehe den nun immer mehr sich steigernden Anforderungen der fortschreitenden Wissenschaft von den ausübenden Optikern genügt werden konnte, und wenn auch Fraunhofers Mikroskope in Wirklichkeit das Höchste noch nicht erreichten, so waren es doch auch hier wieder die Ideen dieses genialen Geistes, welche andere zum Ziele führten. Auf Fraunhofers Bestimmungen fußend, gab der französische Physiker Ernst Selligue dem Optiker Chevalier Vorschriften zu einem Mikroskop, welches in seiner Wirkung alle vorher konstruierten übertraf. Es besaß vier mit einander vereinbare achromatische Doppellinsen von 37 mm Brennweite, eine Einrichtung, die mit dem größten Erfolge bei allen späteren Mikroskopen angewandt ist. Freilich aber waren die Bilder von nur geringer Helligkeit, weil Chevalier die gekrümmte Fläche der Objektivlinse dem Gegenstande zugekehrt hatte. Amici, durch Chevaliers Erfolg angeregt, ließ seine damals in halber Verzweiflung begonnenen Spiegelmikroskope sogleich liegen und wandte sich wieder der Herstellung von Linsenobjektiven zu. Er ordnete sowohl die Objektiv- als auch die Okularlinsen so an, daß deren ebene Flächen nach außen lagen, und gelangte auf diese Weise zur Konstruktion der aplanatischen Mikroskope, bei denen die sphärische Aberration fast vollständig aufgehoben war. Das Jahr 1827, in welchem Amici sein erstes derartiges Mikroskop vollendet hatte, wird daher in der Geschichte der praktischen Optik immer als eine neue Epoche betrachtet werden müssen.

Das zusammengesetzte Mikroskop hatte damit über das einfache in jeder Beziehung den Sieg davongetragen und verdrängte es seitdem von Jahr zu Jahr immer mehr. Die

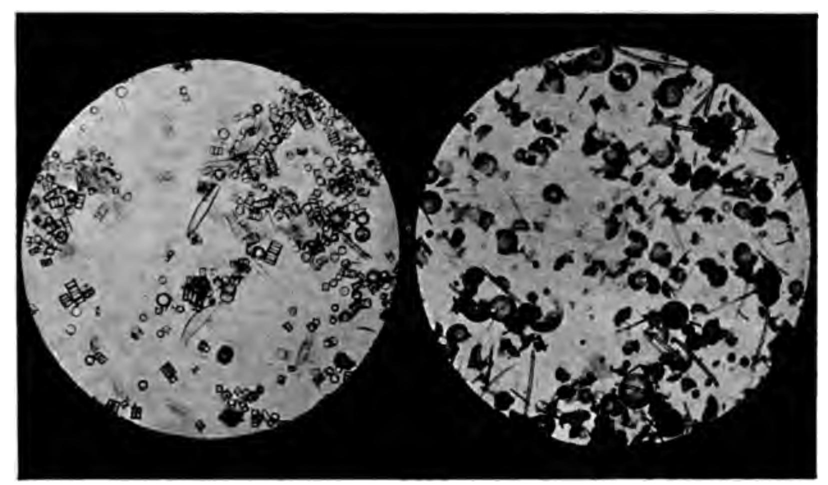
Namen G. und S. Merz & Söhne in München, Robert in Greifswald, Plößl & Komp. in Wien, Schieck in Berlin, Roß, Powells, Smith und Beck in London, Siebert, Kraft und Ernst Seitz in Wetzlar, Dr. E. Hartnack & G. A. Prazmowski in Paris und Potsdam, Benèche & Wasserlein, Wappenhans, Schmidt und Haensch in Berlin, Zeiß in Jena u. s. w. knüpfen sich ruhmvoll an die wichtigen Entdeckungen, welche die letzten vierzig Jahre auf dem Gebiete des organischen Lebens gebracht haben; denn diese Entdeckungen sind zum weitaus größten Teile erst mit Hilfe der Mikroskope, die aus den Werkstätten jener Künstler hervorgingen, möglich geworden.

Der Gebrauch des Mikroskops. Die große Verbreitung, welche das Mikroskop auf den verschiedensten Gebieten der Wissenschaft wie des praktischen Lebens in der letzten Zeit gefunden hat, und die stetig zunehmende Neigung zu mikroskopischen Arbeiten veranlassen uns, noch einige Worte in Bezug auf die Behandlung des Mikroskops hier hinzuzufügen.

Zunächst ist es wünschenswert, wenn man sich nicht mit der Betrachtung von fertigen mikroskopischen Präparaten, wie solche von verschiedenen Seiten in den Handel gebracht werden, begnügen, sondern sich selbst seine Objekte herstellen will, sich folgende von Professor Willkomm empfohlene, zweckmäßige Zusammenstellung von Hilfswerkzeugen zu verschaffen: eine Anzahl Objektträger, bestehend aus kleinen rechteckigen, etwa 2 mm dicken Spiegelglasplatten, ferner äußerst dünne Glasplättchen zum Schutze der Präparate, sogenannte Deckgläschen, einige scharfe Präpariermesser und Präpariernadeln, eine Schere, eine Pinzette, einen Schleifstein, einen Streichriemen, einige Haarpinsel, Uhrgläser, Glasstäbchen, Porzellanschälchen, eine Spirituslampe, einen kleinen Lupenapparat und eine Anzahl chemischer Reagenzien, wie Essigsäure, Chlorcalciumlösung, Glycerin, Jodlösung, absoluten Alkohol, verdünnte Schwefelsäure, Salpetersäure, Kopallack, Kanadabalsam und Zuckerlösung. Als Präpariermesser kann man sich feiner englischer Rasiermesser mit möglichst dünner, ganz flach (nicht hohl) geschliffener Klinge bedienen, welche häufig auf dem Streichriemen abgezogen werden müssen; für harte Gegenstände, Horn, Holz u. s. w., muß man Messer von stärkeren Klingen, ebenfalls auf einer Seite flach geschliffen, anwenden; weiche Objekte, Durchschnitte von Pflanzenteilen oder von sehr kleinen Gegenständen, Haaren u. dgl., werden präpariert, indem man sie zwischen die zwei Hälften eines feinen Korkstöpsels klemmt und senkrecht gegen die Längsachse feine Scheibchen des Korkes abschneidet. Es ist dabei zweckmäßig, dünne Objekte, wie Haare, mittels Gummilösung zu mehreren zusammenzukleben, um sie dann zu zerschneiden. Die Präpariernadeln bestehen aus ganz feinem, hartem Stahl, welche auf einem feinen Schleifstein abzuschleifen sind, um stets eine ganz rostfreie Spitze zu erhalten. Außer geraden Nadeln wendet man während des Beobachtens auch solche mit hakenförmig gebogener Spitze an.

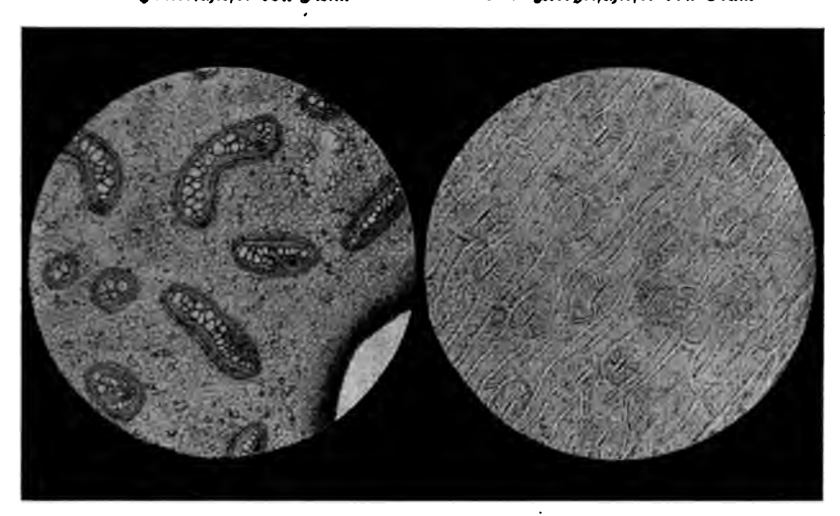
Häufig kommt es darauf an, Mineralien und Felsarten mikroskopisch zu untersuchen; besonders in den letzten dreißig Jahren hat diese Art der Forschung, dank der Förderung, die sie durch Männer wie Sorby, Zirkel, Vogelsang, Fischer, Rosenbusch, Michel Levy u. a. erfahren hat, zu wichtigen Ergebnissen geführt. Hierbei handelt es sich nun um eine andere Herstellungsart der Präparate. Zuerst begnügte man sich, das feine Pulver oder kleine Gesteinssplitter, dünn genug, um noch durchsichtig zu sein, unter dem Mikroskope zu durchmustern; dies Verfahren ist indessen unvollkommen und ließ keine scharfe Bestimmung zu; erst als man gelernt hatte, aus dem harten Gesteinsmateriale so dünne Plättchen herzustellen, daß dieselben völlig durchsichtig wurden, war das Untersuchungsmaterial ordentlich vorbereitet. Wie man solche „Dünnschliffe" anfertigt, ist schon von William Nicol gelehrt worden, namentlich hat der berühmte englische Physiker Sir David Brewster bereits wichtige Beobachtungen über Krystallstruktur, Einschlüsse, Mineralbildung an denselben gemacht (1813—45).

Aber erst als Sorby seine berühmte Arbeit „über die mikroskopische Struktur der Krystalle als Anzeichen für die Entstehung der Mineralien und Gesteine" herausgegeben hatte, wurde diese Forschungsmethode wegen ihrer hervorragenden Fruchtbarkeit allgemein acceptiert, und das Mikroskop als ferner nicht mehr zu entbehrendes Hilfsmittel für die mineralogische und petrographische Untersuchung aufgenommen. Ferdinand Zirkel hat



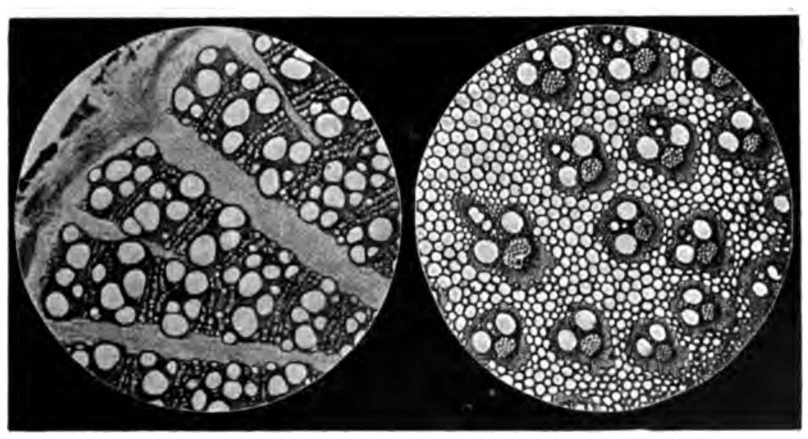
525. Polierschiefer von Bilin.

526. Mergelschiefer von Oran.



527. Querschnitt durch einen Blattstiel von Adlerfarn (Pteris aquilina).

528. Gezähnte Spaltöffnungen der Oberhaut von Schachtelhalm (Equisetum).



529. Gefäßbündel von Osterluzei.

530. Gefäßbündel des spanischen Rohrs.

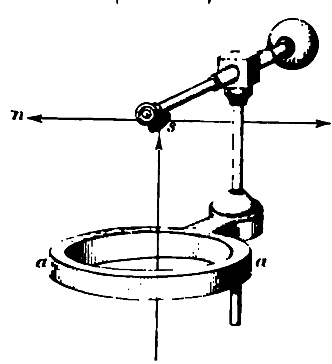
Nach Mikrophotographien von Dr. Burstert & Fürstenberg.

dann durch seine umfassenden Arbeiten und seine mustergültige Darstellung des Beobachteten das meiste dazu beigetragen, daß diese Forschungsart sich in den weitesten Kreisen große Beliebtheit errang.

Die Herstellung der Dünnschliffe geschieht aus flachen Plättchen, die entweder als Scherben durch Abschlagen mit dem Hammer oder durch Abschneiden mittels einer kleinen Rundsäge von dem Gesteinstück gewonnen werden. Diese sucht man zunächst auf einer Seite möglichst plan und glatt zu schleifen, indem man sie auf einer ebenen Eisenplatte mit immer feinerem Schmirgelpulver abschleift, und zwar entweder mit der Hand oder durch eine Schleifscheibe, an deren flache Seite die Plättchen angedrückt werden.

Mit der so erhaltenen glatten und ebenen Fläche werden sie mittels Kanadabalsam auf kleine Spiegelglasplättchen gekittet und nun ganz ebenso auf der anderen Seite abgeschliffen, bis sie so dünn geworden sind, daß man durch sie hindurch beim Auflegen auf eine feine gedruckte Schrift letztere deutlich lesen kann.

Dies tritt bei manchen Mineralien freilich erst bei einer Dünne von weniger als 0,02 mm ein. Alsdann wird nach gehöriger Reinigung vom Schleifpulver ein dünnes Deckgläschen mittels Kanadabalsam zum Schutze auf das Präparat geklebt, das nun zur Untersuchung unter dem Mikroskop fertig ist. Hier zeigen sich dann die einzelnen Mineralbestandteile, aus denen das betreffende Gestein zusammengesetzt ist, unterscheidbar neben einander gelagert; Farbe, Form, Struktur, optische Eigentümlichkeiten, Einschlüsse u. s. w. werden zu Erkennungszeichen, welche nicht nur die mineralogische Natur dieser Bestandteile mit großer Sicherheit bestimmen, sondern oft auch auf die Bildungsweise des Gesteins wichtige Schlüsse ziehen lassen, ob ein Schmelzfluß langsam oder rasch erkaltet, oder bei Gegenwart von Dämpfen, oder durch Absatz aus Wasser, u. s. w.

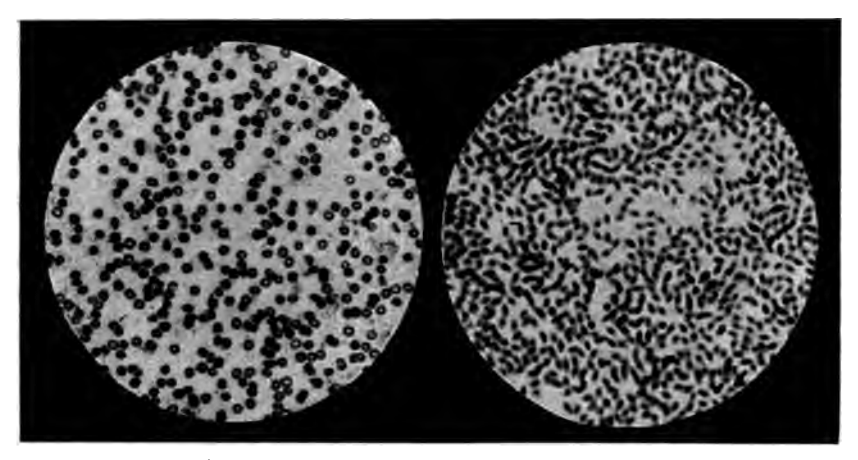


531. Sömmeringscher Spiegel.

Wir haben schon bei der Besprechung des polarisierten Lichtes gesehen, daß das Verhalten desselben beim Durchgange durch krystallisierte oder amorphe Körper ein verschiedenes ist, und bei ersteren wieder ein verschiedenes, je nach den Krystallsystemen, denen die Körper angehören. So subtile Unterscheidungsmerkmale lassen sich mit Hilfe des Polarisationsmikroskops, d. i. eines Meßinstruments, welches eine Kombination des Mikroskops mit einem Polarisationsapparat ist, bei Dünnschliffen sicher und bequem erkennen.

Was den Preis für Mikroskope anbelangt, so richtet sich derselbe natürlich nach dem Zweck, zu welchem es gebraucht werden soll, nach seiner Ausführung und nach seiner Leistungsfähigkeit. Man kann schon für den Preis von 100 Mk. Mikroskope, welche drei Objektivsysteme mit 15—400facher Linearvergrößerung mit Kasten und Zubehör enthalten und welche für sehr viele Untersuchungen ausreichen, von den vorhin erwähnten Firmen beziehen. Ein einigermaßen vollständiger Apparat z. B. ein vollständiges Zeißsches Mikroskop mit Immersionssystemen, feinen Meß-, Beleuchtungs- und Polarisationsvorrichtungen nebst Zubehör kostet freilich gegen 1000 Mk. und mehr.

Angaben über die Vergrößerung der verschiedenen Objektivsysteme sind den Instrumenten fast immer beigefügt. Zur Bestimmung der Vergrößerung dient ein fein geteiltes Glasmikrometer, welches auf den Objekttisch gelegt, und auf welches das Mikroskop scharf eingestellt wird. Über dem Okular, und zwar genau in der Achse desselben bringt man entweder eine Camera lucida an oder einen Sömmeringschen Spiegel (Abb. 531), d. i. einen kleinen ebenen Metallspiegel (von der Größe etwa der halben menschlichen Pupille) unter einem Winkel von 45°, so daß, wenn man in den Spiegel in horizontaler Richtung hineinblickt, man das vom Mikroskop vergrößerte und vom Spiegel reflektierte Bild des Glasmikrometers sieht; dieses projiciert man auf einen in normaler Sehweite aufgestellten Millimetermaßstab und kann aus der Anzahl der Millimeter, welche mit einer bestimmten Anzahl der vergrößerten Intervalle des Glasmikrometers zur Deckung gebracht werden, auf die Vergrößerung des Mikroskops schließen.



532. Menschenblut.　　533. Vogelblut.



534. Reifes Glied des Bandwurms.　　535. Kopf des Bandwurms (Taenia).



536. Katzenfloh (Pulex felis).　　537. Flohmade.

Nach Mikrophotographieen von Dr. Burstert & Fürstenberg.

Die stärkste Vergrößerung, welche man bei den besten Instrumenten erreichen kann, dürfte ungefähr 3000 sein. Diese Grenze, welche gewöhnlich gar nicht angestrebt wird, ist wahrscheinlich auch die äußerste, bis zu der die vergrößernde Kraft von Linsensystemen sich bringen läßt; zur Zeit wenigstens ist keine Aussicht vorhanden, eine weitere Steigerung wirklich nutzbar zu machen; schon über 1000fache Vergrößerung hinaus werden die Bilder häufig so unklar, daß sie für wissenschaftliche Zwecke oft unbrauchbar sind.

Auf der Pariser Ausstellung vom Jahre 1867 befand sich ein Mikroskop von Hartnack, das bei gleichzeitiger Anwendung seines stärksten Objektivs und des stärksten Okulars eine lineare Vergrößerung von 5000 ergab und dabei noch helle Bilder lieferte, allein bei solchen Vergrößerungen vermindert sich die Auflösbarkeit und Diskutierbarkeit der Bilder in einer Art, daß sie für sichere Beobachtungen und Schlußfolgerungen nicht ausreichen. In der neuesten Zeit hat man daher nicht so sehr die Vergrößerung der Mikroskope zu steigern versucht, als vielmehr die Fortschritte der Technik daraufhin angewandt, innerhalb der oben angegebenen Grenzen die Bilder immer heller, klarer, auflösbarer zu machen. Man kann bei gewöhnlichen Mikroskopen die Vergrößerung durch Herausziehen der Rohre, Entfernen des Okulars vom Objektiv, noch steigern und hat auf diesen Umstand Rücksicht zu nehmen, wenn bei Prüfungen die Vergrößerung den angegebenen Zahlen nicht zu entsprechen scheint.

Ein Mikroskop kann eine sehr bedeutende Vergrößerung gewähren und trotzdem unbrauchbare Bilder liefern. Helligkeit und Deutlichkeit derselben sowie Größe des Gesichtsfeldes sind daher von weit wesentlicherem Einfluß auf die Beurteilung der Güte eines Instruments als die Vergrößerung. Es gibt gewisse Präparate, z. B. die staubartigen Schuppen eines in Deutschland verbreiteten Tagschmetterlings Hipparchia Janira, die man in passender Form bei den Optikern zu kaufen bekommt, welche sich als Probeobjekte zur Prüfung von Mikroskopen sehr gut eignen. Jene Schuppen zeigen bei genügender Vergrößerung zunächst eine größere Anzahl von parallelen Längsrippen, welche dann bei stärkerer Vergrößerung durch ein netzförmiges Gewebe höchst feiner Querlinien mit einander verbunden erscheinen. Vermag man diese Querlinien mit der 3—400fachen Vergrößerung eines mittelgroßen Instruments sicher zu erkennen, so ist dasselbe gut. Als Prüfungsobjekte empfehlen sich ferner die rhombische Streifung der Navicula pleurosigma oder die Nobertschen Interferenzglasplättchen, auf denen mittels eines Diamants 7 Liniengruppen eingeritzt sind, deren Intervalle von 0,01 mm bis zu 0,0001 mm abnehmen.

Wenn der Anfänger mit seinem Mikroskop nicht sofort gute Bilder erhält, so darf er dasselbe nicht sogleich als unbrauchbar ansehen. Die Schuld kann öfter an ihm selbst liegen, sowie an der Herstellung der Präparate. Da durchscheinendes Licht dem auffallenden in den meisten Fällen vorzuziehen ist, so müssen die Objekte in ganz zarten, dünnen Plättchen angefertigt werden, und das ist nicht leicht; eine vorläufige Untersuchung mit der Lupe wird aber schon erkennen lassen, ob die Herstellung gelungen ist oder nicht. Das Präparat wird sodann, mit einem Tropfen reinen Wassers benetzt, auf das Objektivglas gebracht und mit einem Deckgläschen bedeckt, damit keine Luftbläschen oder Teilchen fremder Körper dazwischen kommen. Überhaupt ist die größte Reinlichkeit bei der Herstellung nötig, die Gläser müssen jedesmal sauber, am besten mittels eines alten, ausgewaschenen leinenen Läppchens, abgeputzt werden. Chemische Reagenzien, die mitunter zur Behandlung der Objekte gebraucht werden, dürfen weder in Berührung mit den Metallteilen, noch mit den Linsen des Mikroskops kommen, weil diese aus bleihaltigen, sehr leicht angreifbaren Glassorten bestehen.

Für die Untersuchung ist es am besten, von vornherein nur schwache Vergrößerungen, aber mit größerem Gesichtsfeld, anzuwenden, und erst wenn man die geeignetsten Partieen des Objekts erkannt hat, die Auflösung durch schärfere Gläser vorzunehmen. Besonders gut gelungene, von organischen Gebilden gewonnene Präparate hebt man auf, indem man die Ränder des Deckgläschens, um äußere ungünstige Einflüsse abzuhalten, mit Papier verklebt, schließlich auch mit Asphaltfirnis oder einer Lösung von Kopallack in Weingeist verkittet. Die Durchsichtigkeit bewahrt man ihnen, indem man je nach der Natur der präparierten Körper zwischen die beiden Gläser vor dem Zusammenpressen und



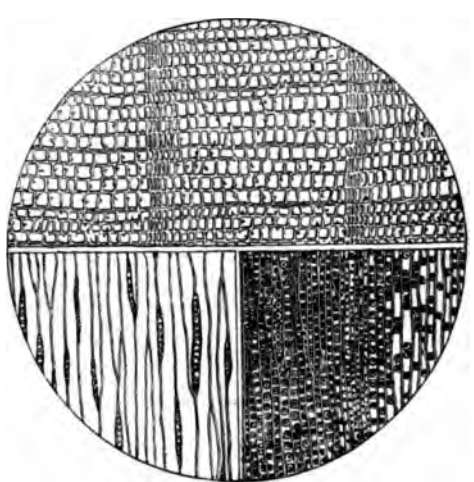
538. Kreide von Gravesend.



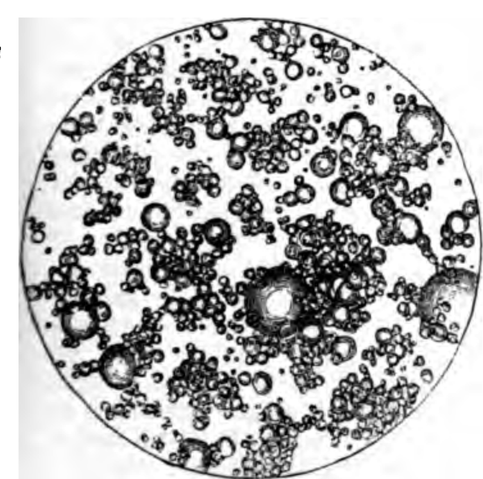
539. Kreidekalk vom Antilibanon.



540. Guano.



541. Anatomie des Tannenholzes; obere Hälfte Querschnitt; untere Hälfte rechts Radialschnitt, links Tangentialschnitt.



542 Reine Butter.



543. Reiner Leinenbatist.

Verkitten einen Tropfen Wasser, Weingeist, Terpentinöl, Kanadabalsam, Chlorcalcium-lösung oder dergleichen gibt. Gesteinsdünnschliffe werden, wie schon angegeben, in Kanadabalsam eingebettet.

Was sieht man durch das Mikroskop? Zu schildern, ja selbst nur in allgemeinen Zügen anzudeuten, welchen Einfluß auf die Förderung aller naturwissenschaftlichen Disziplinen wir dem Mikroskop verdanken, können wir nicht unternehmen. Dazu würde der Raum eines umfangreichen Werkes notwendig sein. Denn wenn schon in der unorganischen Welt der Gesteine ganz ungeahnte Aufschlüsse durch das Mikroskop gewonnen worden sind, so ist fast die ganze Geschichte der organischen Wissenschaften nur eine Paraphrase der Entdeckungen, welche sich an die Erfindung des Middelburger Brillenmachers knüpfen. Wenn wir daher mit einigen Schlußbemerkungen von dem Gebiete der Optik Abschied nehmen und, um uns die Früchte zu vergegenwärtigen, welche die Erforschung und Erkenntnis der wunderbaren Erscheinungen des Lichtes getragen haben, in die neu erschlossene Welt der kleinsten Räume einen flüchtigen Blick werfen, so kann uns nur das Oberflächliche, die äußere Gestaltung reich bebauter Landschaften auffallen: die zarten und feinen Formen ihrer Gebilde enthüllen sich nur demjenigen, der sich tiefer und eingehender in sie zu versenken vermag.

Erweiterte das Teleskop, indem es unser Auge in die Geheimnisse des unendlichen Raumes eindringen ließ, in ungeahnter Weise die Grenzen unserer Erkenntnis, so zeigt uns das Mikroskop, indem es die Dinge in ihre einzelnen Bestandteile auflöst, ihr Werden; es läßt uns Schlüsse über den Entwickelungsgang bilden, auf welchem das Bestehende sich aufbaute, und von der Wechselwirkung der Kräfte, in deren Kampfe im Laufe der Zeiten alle die Veränderungen und Entwickelungsformen durchlaufen wurden, deren Spuren in weiter Vergangenheit hinter uns liegen. Nimm ein Stück Kreide in die Hand und bringe den feinen Staub, der an deinen Fingern haften bleibt, unter das Mikroskop! Welcher Reichtum regelmäßiger Bildungen, die organischem Leben ihren Ursprung verdanken! Das ganze Stück der weißen Masse besteht aus lauter feinen, kieseligen und kalkigen Panzern untergegangener Tiere, Polythalamienschalen und Skeletten von solcher Kleinheit, daß in einem Kubikzentimeter oft mehr als 298 000 Millionen neben einander gebettet sind. Und in den Alpen gibt es Gebirge von Tausenden von Metern Höhe, aus lauter solchen Tierresten aufgebaut, und vom 57. Grade nördlicher Breite bis hinunter an das Kap Horn ist die Kreideformation verbreitet. Und alle diese einzelnen Teilchen können nach ihrem Ursprunge unterschieden werden, sind systematisch in Arten geordnet worden, wie wir die Fische oder Vögel klassifizieren!

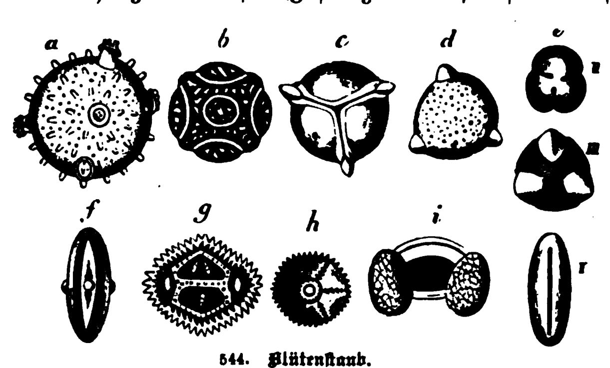
Ehrenberg, der berühmte Erforscher der mikroskopischen Welt, der die Kenntnis der Natur auf diesem Gebiete mit einer so großen Zahl neuer Thatsachen bereichert hat, zählte allein in der Kreide von Gravesend (Abb. 538) 51 verschiedene Polythalamienschalen; im Kreidekalk vom Antilibanon (Abb. 539) fand er deren 43, und die Vergleichung der in den beiden Abbildungen dargestellten Formen kann jeden Beschauer belehren, wie sich verschiedener Ursprung, abgesonderte, der Zeit und dem Raume nach getrennte Bildung, selbst der Einfluß späterer Epochen dem bewaffneten Auge zweifellos verraten.

Die Ergebnisse mikroskopischer Gesteinsuntersuchungen, besonders der geschichteten Sedimentgesteine, hat Ehrenberg zu einer selbständigen Wissenschaft, der Mikrogeologie, geordnet, welche die wichtigsten Kapitel der Geschichte der Erdentwickelung noch zu schreiben berufen ist.

Betrachten wir die Pflanzenwelt! Da ist ein klarer, schnellfließender Bach, sein Grund ist von einem saftgrünen Rasen überzogen, der von den durchwachsenen und verschlungenen Zweigen einer Alge gebildet wird. In der ersten Zeit des erwachenden Frühlings lösen wir ein Stückchen Rasen ab, um es daheim zu beobachten. Wir entwirren behutsam einige Fäden, und das Mikroskop zeigt uns, daß sie aus einfachen oder bei anderen Arten aus mehrfach zusammengesetzten, in Zellen geteilten Schläuchen bestehen, in denen Kügelchen oder Körnchen liegen. Diese sogenannten Sporen fangen, wenn ihre Zeit gekommen ist, an, in ihrem Gefängnisse so lange zu drängen, bis sie dessen Wände zersprengt haben; sodann treten sie aus, einzeln oder in Haufen, und geraten

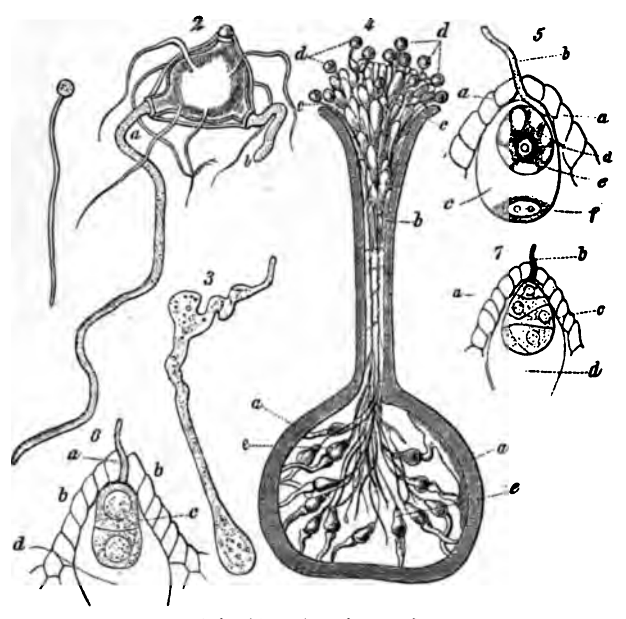
alsbald in lebhafte Bewegung, fahren im Wasser hin und her, tauchen auf und unter, so daß man meinen möchte, die Pflanze habe ein Tier geboren. Aber nein, es ist etwas anderes.

Das merkwürdige Ding rudert allerdings mittels zarter, ungemein lebhaft sich bewegender Härchen oder Wimpern wie mit Schwimmfüßen, aber seine Bewegung ist eine völlig willenlose, sein Herumschwärmen hängt von tausend Zufälligkeiten ab, es steuert auf entgegenstehende Hindernisse gerade los und bleibt oft wirbelnd an der Wand des Gefäßes hängen, von der die mit willkürlicher Bewegung begabten Geschöpfe schnell zurückprallen würden. Diese Wimperbewegung ist eine sehr allgemeine Naturerscheinung in der Tier- und Pflanzenwelt, deren wahre Ursache noch nicht vollständig aufgeklärt ist. Nachdem unsere Spore sich 10—20 Minuten herumgetummelt hat, wird ihre Bewegung immer langsamer, endlich kommt sie nach etwa zwei Stunden zur Ruhe, die Bewegungen der Wimpern hören auf, diese selbst verschwinden, die Spore nimmt die Kugelform an, sie bekommt an mehreren Seiten Fortsätze und wächst zur Alge aus. Wir haben das Gebären einer Pflanze beobachtet; die Spore ist ein Pflanzenkeim. Und wie groß ist eine solche Spore? Nun mit unbewaffnetem Auge kann man sie schwerlich sehen, bei 400facher Vergrößerung aber erscheint sie so groß wie ein Kirschkern und fast ebenso gestaltet. Und wie diese ersten Regungen einer Pflanze, so zeigt uns das Mikroskop auch die Geheimnisse ihrer höchsten Entwickelung. Es belehrt uns über das Wesen der Befruchtung,



544. Blütenstaub.

Pollenkörner von a Kürbis; b Passionsblume; c Cuphea procumbens; d Weberkarde; e Gartenwinde; f Wasserweidrich; g Goldbistel; h Zichorie; i Kiefer.



545. Befruchtung der Samenpflanzen.

und mit seiner Hilfe erfahren wir, welche Funktionen den einzelnen Teilen der Blüte zukommen. Betrachten wir den Blütenstaub (das Pollen, wie der Botaniker sagt) der Pflanzen mit bloßem Auge, so erkennen wir in ihm zunächst weiter nichts als ein überaus zartes Pulver von meistenteils gelber Farbe. Bringen wir ihn aber unter das Mikroskop, so wird das mehlartige Pulver zu regelmäßig gestalteten Körpern, deren bestimmte Formen uns die Mutterpflanze, welcher sie entstammen, mit Sicherheit erkennen lassen. Wir sehen, daß jedes Körnchen aus einem inneren, mit einer höchst zarten Haut versehenen Körper besteht, welcher von einer äußeren Haut mit mancherlei Auswüchsen, Stacheln u. s. w. umschlossen ist, aus deren Öffnungen er herausquellen kann, wie es

bei c, d und e III in unserer Abb. 544 dargestellt ist. Und wenn wir die Weiterentwickelung dieser Körnchen verfolgen, so wird es uns klar, wozu diese merkwürdige Gestaltung nützlich ist. Wir wissen, daß außer den Staubfäden, welche den Blütenstaub in den Staubbeuteln enthalten, die Blüte in dem Pistill das eigentliche Befruchtungsorgan trägt. Dieses Pistill, welches uns Abb. 545 (4) vergrößert zeigt, besteht aus dem unteren erweiterten Teile, dem Fruchtknoten a in welchem die Eier e auf dicken Stielen sitzen, aus dem Griffel b und aus der Narbe, dem obersten Teile, welcher aus zarten, blasigen Zellen besteht, die eine klebrige, zuckerhaltige Flüssigkeit, die Narbenfeuchtigkeit, absondern. Mit Hilfe dieser Feuchtigkeit hält die Narbe das auf sie gelangende Pollen fest und bewirkt ein Aufquellen der inneren feinen Haut, welche in Form von fadenförmigen Schläuchen aus den Öffnungen der äußeren Haut heraustritt. Die Entstehung der Pollenschläuche heißt das Keimen des Pollen.

Bei 1 ist unter d ein gekeimtes Staubkorn des Maiblümchens, unter 2 ein solches des Weidenröschens, unter 3 eins der Spritzgurke abgebildet; 4 aber zeigt, wie die Pollenschläuche, in die sich der zähflüssige Inhalt des Kornes ergossen hat, durch den oft sehr langen Griffel hinabwachsen in die Fruchtknotenhöhle hinein, wo sie in die oben geöffneten Eier durch den Eiermund hinein gelangen (vgl. 5, 6 und 7) und hier durch Überführen ihres Inhalts die Befruchtung bewirken.

Bei 5 und 6 ist der Vorgang abgebildet, wie er bei der Kaiserkrone in verschiedenen Stadien der Entwickelung stattfindet, während 7 ein mehrzelliges Keimkügelchen c der Pictia obovata, einer tropischen Wasserpflanze, zeigt.

Mit diesen Wahrnehmungen ist jedoch die Grenze noch nicht erreicht, bis zu welcher die auflösende Kraft des Mikroskops zu dringen vermag. Nur können wir an dieser Stelle nicht auf die subtilsten Untersuchungen weiter eingehen, deren Verständnis andere Vorbegriffe voraussetzen würde, als wir zu erläutern den Raum haben. Aus dem Angeführten aber dürfte schon hervorgehen, wie klärend die auf diese Weise gewonnenen Anschauungen auf unsere Vorstellungen vom Wesen der organischen Gebilde gewirkt haben, und daß uns diese Erkenntnis auch Mittel zeigen wird, auf rationelle Weise Wachstum, Blüte und Frucht zu begünstigen, schädliche Einflüsse abzuwehren und nach unseren Zwecken die unentbehrliche Thätigkeit des Pflanzenreichs zu erhöhen.

Erst durch den Gebrauch des Mikroskops ist uns die Zelle als Elementarbestandteil der Pflanze bekannt und die Botanik durch die Pflanzenphysiologie, welche sich mit den Veränderungen des organischen Werdens und Wachsens und ihren Ursachen beschäftigt, zu einer wirklichen Wissenschaft geworden.

Was uns als widriger Schimmel an Brot und anderen Speisen begegnet, verwandelt sich unter dem Mikroskop in den zierlichsten Wald, von größerem Formenreichtume, als ihn unsere Laub- und Nadelwälder aufweisen. Der Traubenschimmel besteht aus zelligen Fäden, die sich entweder durch Abschnürung oder durch besondere Fruchtbehälter mit zahlreichen Keimzellen fortpflanzen. Auf diese Weise vermag sich das Gewächs mit reißender Schnelligkeit weiter zu verbreiten.

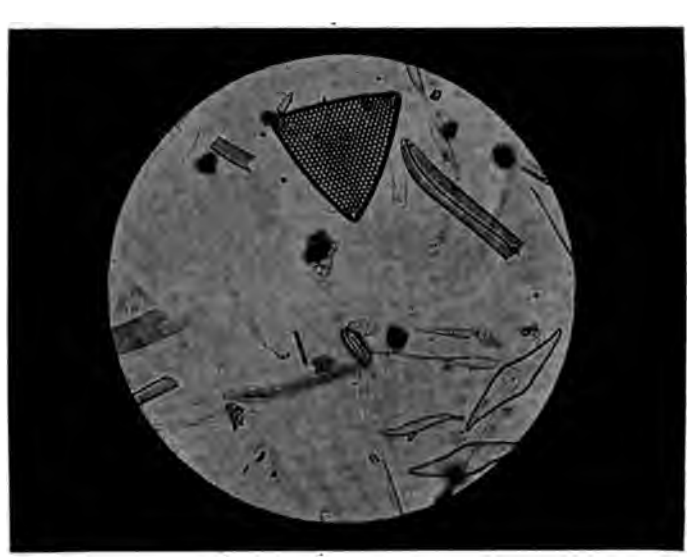
Nicht nur die Kartoffelkrankheit, sondern auch tierische und menschliche Krankheiten, z. B. die Kinderschwämmchen, sind durch gewisse, dabei auftretende Pflanzen, namentlich Pilzbildungen, charakterisiert, und die neueren Forschungen haben es wahrscheinlich gemacht, daß eine große Anzahl von Krankheiten, die ihren hauptsächlichen Charakter in chemischen Veränderungen des Bluts oder der Säfte des Körpers haben, mit dem Vorhandensein mikroskopischer, pflanzlicher oder tierischer Gebilde in engster Wechselbeziehung stehen.

Pilze, Bakterien, Bacillen — wer hat nicht schon diese niedrigsten Formen des organischen Lebens als die wahrscheinlichen Ursachen der gefährlichen Krankheiten Milzbrand, Cholera, Typhus, Tuberkulose, Diphtheritis u. s. w. nennen hören? Ihre Entdeckung ist nur durch das Mikroskop geschehen, ihre weitere Erforschung und damit auch die Auffindung der wirksamsten Bekämpfungsmittel dürfen wir von demselben Instrumente erhoffen.

Tier- und Pflanzenwelt, welche die Systematik früher als zwei scharfbegrenzte Reiche hinstellte, berühren sich an den verschiedensten Grenzgebieten; ihre unterschiedlichen

Merkmale verschwinden um so mehr, je weiter wir mit Hilfe des Mikroskops in ihr Wesen eindringen.

Die Diatomeen, winzig kleine Geschöpfe, welche das bloße Auge erst sieht, wenn einige Millionen derselben beisammen liegen, bestehen aus einer Hülle von Kieselerde mit etwas Schleim im Innern und sehen bald wie Schiffchen, bald wie Stäbchen, Semmelreihen, Treppen, Siebe, Scheibchen u. s. w. aus. Ihre fabelhaft rasche Vermehrung geht vor sich durch Teilung oder auch dadurch, daß eins aus dem anderen herauswächst. Sie treiben und leben im Wasser und im feuchten Erdreich, aber wie leben sie? Keine Spur von Organen zur Aufnahme von Nahrung oder sonstige tierische Merkmale sind zu entdecken, ebensowenig aber lassen sich die Geschöpfchen dem gewöhnlichen Begriff der Pflanze unterordnen. Sie sind sozusagen die Primärstufen des organischen Lebens. Ehrenberg fand, daß beinahe ganz Berlin auf solchen Wesen steht, die in den oberen Schichten noch leben. Da ihre Kieselpanzer unverweslich sind, so ist die Menge abgestorbener Exemplare natürlich noch viel größer. Ihre Katakomben sind die Lager von Kieselgur, Bergmehl und mergeligen Gesteinen, welche, wie Kreide, ganze Gebirge bilden. So zeigt Abb. 546 Diatomeen aus dem Watt von Husum.



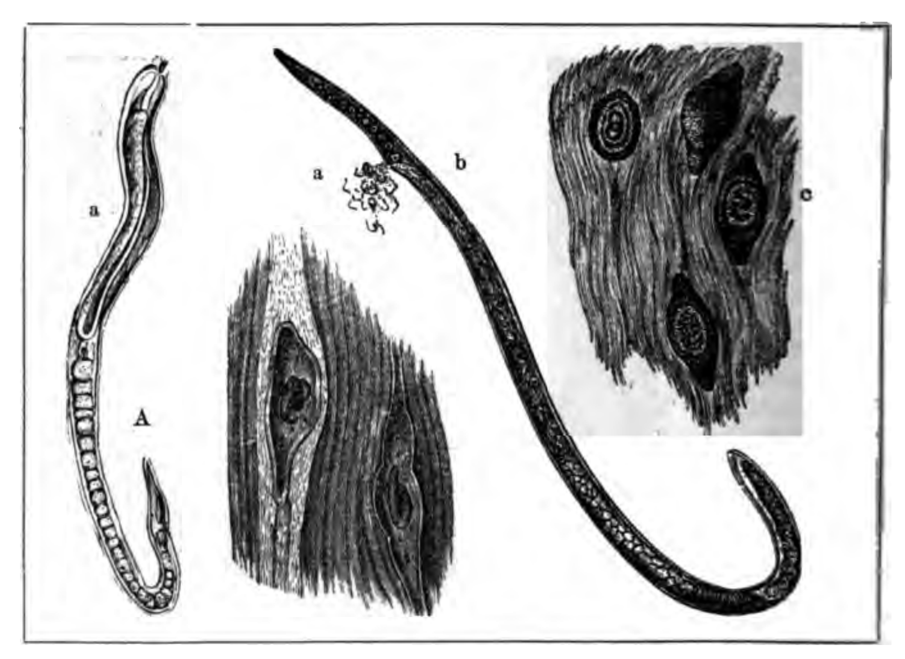
546. Diatomeen aus dem Watt von Husum.
Nach einer Mikrophotographie von Dr. Burstert & Fürstenberg.

Wie der Botanik, so ist naturgemäß das Mikroskop auch denjenigen Wissenschaften, welche sich mit dem animalischen Organismus beschäftigen, das wesentlichste Förderungsmittel geworden. Die rohe Empirie in der Behandlung von Krankheiten hat rationellen Heilmethoden Platz machen müssen, seitdem man gelernt hat, die Thätigkeit der Nerven, der Haut, der Muskeln aus der genauesten Beobachtung ihrer kleinsten Organe zu erkennen und die Veränderungen im normalen Verlaufe der körperlichen Funktionen auf ihre wahren Ursachen zurückzuführen. Das Mikroskop unterscheidet auf das genaueste menschliches Blut von tierischem und entlarvt mit derselben Sicherheit ein Verbrechen, wie es die Verfälschung leinener Gewebe oder teurer Gewürze aufdeckt.

Man zählt die Zahl der Blutkörperchen, welche in einem Kubikzentimeter jenes „ganz besonderen Saftes“ enthalten sind, der unser Leben erhält, und man weiß ihrer Armut zu steuern, ihren Reichtum zu mindern. Unsere Sinnesorgane selbst, die wichtigsten Werkzeuge, denen wir alle Kenntnis verdanken, sie sind uns erst in ihren verborgensten Funktionen bekannt geworden durch die mikroskopische Untersuchung ihres inneren Baus.

Wir brauchen nicht weit in die Vergangenheit zurückzugreifen, um sprechende Beispiele zu finden. Im Jahre 1860 entdeckte Dr. Zenker in Dresden, daß kleine parasitische Tierchen, Trichinen, deren Existenz schon im Anfange der dreißiger Jahre bekannt war, sich bald in größerer, bald in geringerer Menge in den Muskeln Verstorbener vorfanden, und daß die Anwesenheit derselben im Muskelfleisch des lebenden Menschen die Veranlassung zu einer gefährlichen Krankheit, der Trichinose, zu sein schien. Von dem

Augenblicke an, wo die Aufmerksamkeit auf diese Schmarotzer gelenkt war, wuchs die Anzahl der beobachteten Krankheitsfälle in außerordentlichem Maße, und da man in nicht seltenen Fällen den eingetretenen schmerzhaften Tod als Folge des massenhaften Vorhandenseins jener Tiere ansehen mußte, bekam die Sache eine große Bedeutung. Aus den Beobachtungen der Eingeweidewürmer, namentlich aus den Untersuchungen über den Bandwurm, war bekannt, daß viele Tiere gewisse Lebensphasen in verschiedenen größeren Tieren durchmachen, und so fand man auch bald, den andeutenden Spuren folgend, daß die Trichinen vorzugsweise durch den Genuß rohen Schweinefleisches in den menschlichen Körper übergeführt werden. Dem Schweine sind wahrscheinlich diese inneren Bewohner nicht lästig, in den menschlichen Körper aber aufgenommen vermehren sie sich daselbst in rapidester Weise und wissen ihren Weg nach Durchbohrung der Eingeweidewände in die Muskeln zu finden, in welchen sie sich mit einer kalkigen Kapsel umgeben und jene schmerzhaften Symptome hervorrufen, denen in vielen Fällen der unabwendbare Tod gefolgt ist. Ge-



547. Männliche Trichine. 548. a Stück Fleisch mit aufgeschnittenen Trichinenkapseln; b Weibliche Trichine; c Fleisch mit verkalkten Trichinenkapseln.

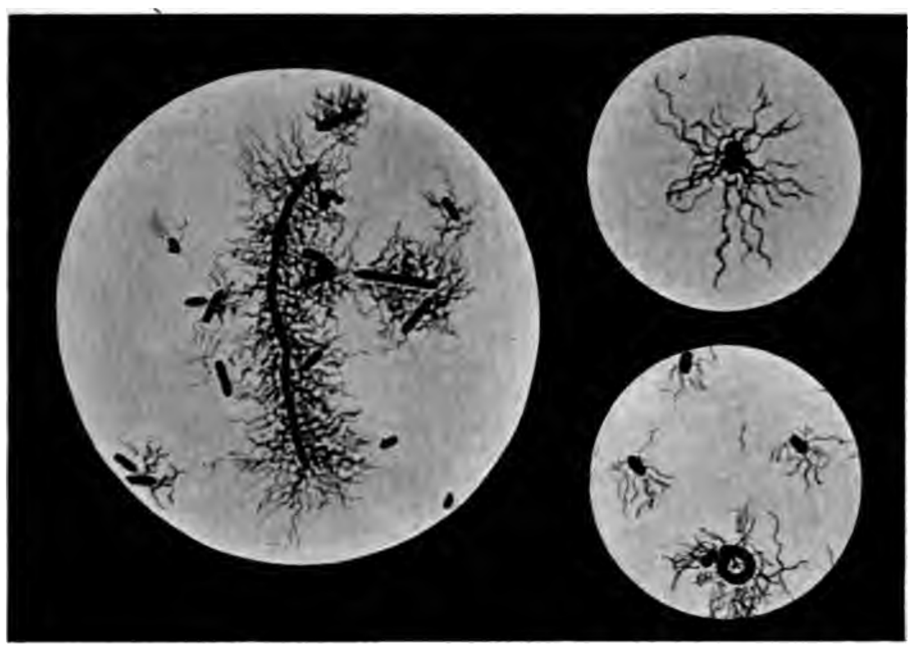
wiß sind die Trichinen keine Erfindung der Neuzeit — sie sind jedenfalls in früherer Zeit ebenso aufgetreten und haben plötzliche Todesfälle ebenso bewirkt wie jetzt. Aber man war in der Unkenntnis der wahren Ursache zu allen möglichen Vermutungen geneigt. Ist es doch vorgekommen, daß man auf absichtliche Vergiftungen geschlossen und auf oberflächlichen Verdacht hin Untersuchungen angestellt hat, deren Grundlosigkeit sich erst ergab, nachdem man in den wieder ausgegrabenen Leichen das Vorhandensein von Trichinen hat nachweisen können.

Es hat sich die Notwendigkeit der Einführung der obligatorischen Untersuchung des Schweinefleisches in Bezug auf Trichinen herausgestellt, und mit dem Mikroskop wird heute vom Fleischbeschauer den gefährlichen Tierchen nachgespürt.

In Abb. 550 u. 551 ist der Erreger des Typhus abdominalis (Unterleibstyphus) sowohl einzeln und zwar gerade in Teilung begriffen 1650fach, wie als Gruppe 1100fach vergrößert dargestellt. Die Bacillen sind in Wirklichkeit 0,0025 bis 0,003 mm lang und etwa halb so dick. Bisweilen bleiben die einzelnen Bacillen mit einander verbunden, statt sich nach der Teilung zu trennen, und bilden alsdann häufig recht lange Fäden, wie

Proteus vulgaris (Abb. 549), welche man nach geeigneter Färbung schon bei schwächerer Vergrößerung erkennt.

Neben derartigen unschätzbaren, materiellen Erfolgen verdanken wir dem Mikroskop wie keinem anderen Instrument eine Reinigung der Begriffe, eine Klärung der Ideen, durch welche die exakten Wissenschaften hohe, reformatorische Bedeutung erhalten. Dem auf dem reich gedüngten Felde der Dummheit und Indolenz üppig wuchernden Kraut „Aberglauben" wurde durch das Mikroskop eine Wurzel nach der anderen abgeschnitten. Welchen Schrecken haben nicht früher die unter dem Namen Blut-, Schwefelregen und dergleichen bekannten Erscheinungen der unkundigen Menge eingeflößt? Mit Hilfe des Mikroskops sind sie auf ihre wahren Ursachen zurückgeführt worden. Das erstgenannte Phänomen beruht auf dem Auftreten einer winzig kleinen Infusorie, die man wegen ihrer



549 550 u. 551.

549. Proteus vulgaris. 550 u. 551. Typhusbacillen.

Nach Mikrophotographieen von Dr. E. Zettnow.

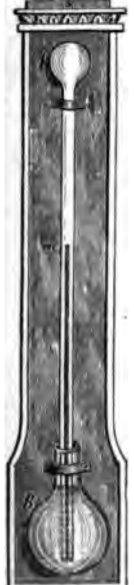
erstaunlich schnellen Vermehrung die Wundermonade genannt hat. Es gelang Ehrenberg, diese Infusionstierchen genau zu untersuchen. Er fand ihre Verwandtschaft, beobachtete ihre Entwickelung und maß ihre Größe, die etwa 0,0005 bis 0,0015 mm beträgt, so daß zur Ausfüllung eines Kubikzentimeters Milliarden gehören. Die Monade bewegt sich lebhaft und unstät mit Hilfe eines kleinen Rüssels, und da das einzelne Tier fast farblos ist und nur zwei winzige rote Punkte besitzt, so kann man sich vorstellen, welche Zahlenmengen von Individuen dazu gehören, um einem Schneefelde von oft meilenweiter Ausdehnung die rote Färbung mitzuteilen. Der Schwefelregen zeigt bei mikroskopischer Untersuchung, daß er aus dem Blütenstaube von Erlen, Ulmen, Fichten, Kiefern oder dergleichen besteht.

Auf dem verfaulten phosphoreszierenden Weidenholze erblicken wir eine mikroskopische Flechte, welche einen eigentümlichen Schein ausstrahlt, und das zauberische Leuchten des Meeres ist die Folge von Myriaden kleiner Tierchen, die zu Hunderttausenden in jedem Meerestropfen funkeln.

Von der Wärme.

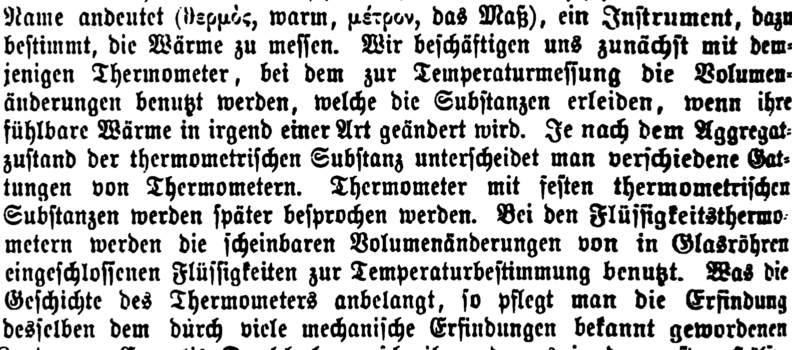
Thermometrie. Drebbels Luftthermometer. Das Quecksilberthermometer. Herstellung desselben. Eispunkts- und Siedepunktsbestimmung. Skalen von Réaumur, Celsius und Fahrenheit. Normalthermometer. Kaliber- und Teilungsfehler. Fadenkorrektion. Thermische Nachwirkungen. Jenenser Glas. Maximum- und Minimumthermometer. Thermische Ausdehnung. Linearer Ausdehnungskoeffizient. Kompensationspendel. Metallthermometer. Kubische Ausdehnung.

Die Erscheinungen der Außenwelt kommen uns zum Bewußtsein durch Vermittelung unserer Sinne. Wie der Gehörnerv den Schall, der Sehnerv das Licht uns zur Empfindung bringt, so empfinden wir Kälte und Wärme durch unsere Gefühlsnerven. Wenn wir unsere Hand in Eiswasser tauchen, so wird in ihr ein Kältegefühl erregt, und ein Gefühl der Hitze, wenn wir einen geheizten Ofen berühren. Indessen bietet unser Gefühl nur einen unsicheren Maßstab für die Beurteilung der Temperatur. Was dem einen heiß erscheint, erscheint dem andern nur warm, und selbst für ein und dieselbe Person ist die Empfindlichkeit und Beurteilungsfähigkeit für Temperatur in hohem Maße abhängig von der momentanen körperlichen Disposition und dem momentanen psychischen Zustand. Es fehlt unserm Gefühl zur zuverlässigen Beurteilung des thermischen Zustandes ein Vergleichungspunkt. Und wenn letzterer uns auch keineswegs Aufklärung darüber geben kann, wie und warum unsere Gefühlsnerven durch die Wärme affiziert werden, so gewährt er uns doch einen gewissen Anhalt, der uns vorläufig genügt und uns darüber hinwegtäuscht, nach den tieferen Ursachen zu forschen.



552. Das Drebbelsche Luftthermometer.

„Das Thermometer beschäftigt jedermann, und wenn er schmachtet oder friert, so scheint er in gewissem Sinne beruhigt, wenn er nur sein Leiden nach Réaumur oder Fahrenheit dem Grade nach aussprechen kann." Diesem Goetheschen Ausspruche liegt viel Wahres zu Grunde.



Das Thermometer ist, wie sein dem Griechischen entnommener Name andeutet (θερμός, warm, μέτρον, das Maß), ein Instrument, dazu bestimmt, die Wärme zu messen. Wir beschäftigen uns zunächst mit demjenigen Thermometer, bei dem zur Temperaturmessung die Volumenänderungen benutzt werden, welche die Substanzen erleiden, wenn ihre fühlbare Wärme in irgend einer Art geändert wird. Je nach dem Aggregatzustand der thermometrischen Substanz unterscheidet man verschiedene Gattungen von Thermometern. Thermometer mit festen thermometrischen Substanzen werden später besprochen werden. Bei den Flüssigkeitsthermometern werden die scheinbaren Volumenänderungen von in Glasröhren eingeschlossenen Flüssigkeiten zur Temperaturbestimmung benutzt. Was die Geschichte des Thermometers anbelangt, so pflegt man die Erfindung desselben dem durch viele mechanische Erfindungen bekannt gewordenen holländischen Landmann Cornelis **Drebbel** zuzuschreiben, der es in der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts erfunden haben soll. Nach anderen Angaben soll der Engländer Robert **Fludd** zu Oxford ein solches Instrument erfunden haben und der Arzt **Sanctorius** um 1600 mittels eines eigentümlichen Apparates im stande gewesen sein, die Wärme des menschlichen Körpers zu messen. Gewiß ist ferner, daß **Galilei** bereits um 1592 eine Art Luftthermometer angewandt hat, dessen an einem Ende offene Röhre mit Wasser und Luft angefüllt gewesen ist.

Das sogenannte **Drebbelsche** Luftthermometer (Abb. 552) bestand aus einer an dem einen Ende offenen und an dem anderen Ende zu einer Kugel ausgeblasenen Glasröhre A, deren offenes Ende in ein mit gefärbter Flüssigkeit gefülltes Gefäß B getaucht war. Die Luft in der Kugel A wurde erwärmt, so daß sie zum Teil entwich, und die Flüssigkeit bei mittlerer Lufttemperatur etwa bis zum Punkte m der Röhre durch den äußeren Luftdruck emporgetrieben wurde. Wurde das Instrument in einen wärmeren Raum gebracht, so dehnte sich die Luft in der oberen Kugel aus und trieb die Flüssigkeit in der Röhre herab; umgekehrt stieg die Flüssigkeitssäule höher, wenn das Instrument in einen kälteren Raum gebracht wurde, indem sich die Luft in der oberen Kugel A zusammenzog.

Diese Anordnung erhielt mannigfache Abänderungen. Das Flüssigkeitsgefäß B wurde mit der Röhre vereinigt, indem man diese ebenfalls unten in eine Kugel endigen ließ, die oben eine kleine Öffnung erhielt. Becher bog den Schenkel der unteren Röhre wieder aufwärts und füllte ihn zum Teil mit Quecksilber, auf welchem er eine Figur schwimmen ließ, die ihren Stand an einer Skala mittels eines Zeigers anzeigte.

Die noch heute gebräuchliche und zweckmäßigste Form der Thermometer wurde zuerst von der Florentiner Accademia del Cimento angegeben. Danach bestand das Instrument aus einer senkrechten, unten zu einer Kugel erweiterten, oben aber geschlossenen Röhre, die im Innern zum Teil mit Alkohol gefüllt, im übrigen aber leer war. Diese Einrichtung hat bis heute keine wesentlichen Veränderungen erfahren, nur daß mit der Zeit der Alkohol wegen der Schwierigkeit, ihn rein darzustellen, und wegen seines ungleichmäßigen thermischen Verhaltens bei verschiedenen Temperaturen durch das Quecksilber ersetzt worden ist, das verhältnismäßig leicht rein herzustellen, und dessen thermisches Verhalten ein sehr gleichmäßiges ist.

Herstellung eines Quecksilberthermometers. Für die Anfertigung eines Quecksilberthermometers ist zunächst die Auswahl einer geeigneten Kapillarröhre von größter Wichtigkeit; sie soll ihrer ganzen Länge nach kalibrisch, d. h. an jeder Stelle von gleichem Querschnitt sein, was in aller Strenge selten der Fall ist. Dieselbe wird dann an dem einen Ende zugeschmolzen und hier mit Hilfe der Glasbläserlampe zu einer Kugel aufgeblasen, während an dem anderen Ende eine trichterförmige Erweiterung angeblasen wird. Alsdann wird durch Erhitzen der Kugel alle in ihr etwa noch vorhandene Feuchtigkeit und Luft ausgetrieben und darauf in die obere trichterförmige Erweiterung Quecksilber gegossen. Beim Erkalten zieht sich die im Innern der Kugel befindliche Luft auf ein geringeres Volumen zusammen, und der Druck der äußeren Luft treibt das Quecksilber in den dadurch entstandenen luftverdünnten Raum. Zwar füllt sich auf diese Weise die Kugel beim ersten Male noch nicht vollständig; man wird diese Manipulation mehrmals wiederholen müssen, indem man oben Quecksilber nachfüllt, bis dieses an die Stelle der in der Kugel und in der Kapillarröhre enthaltenen Luft getreten ist, wenn diese durch wiederholtes Erhitzen der Kugel bis zum Sieden des Quecksilbers vollständig ausgetrieben ist. Sind auf diese Weise Kugel und Kapillare mit der nötigen Quecksilbermenge gefüllt, so erhitzt man erstere wieder, bis alle Luft herausgetrieben und Quecksilberdämpfe am oberen Ende der Röhre heraustreten, und schmelzt sie alsdann dicht über dem Quecksilberfaden zu. Denken wir uns nun die Kapillarröhre mit einer willkürlichen Teilung versehen, um den Stand der Quecksilbersäule in ihr ablesen und fixieren zu können, so würde letzterer als Maß für die Temperatur des Thermometers, und wenn dasselbe genügend lange Zeit mit einer in Bezug auf ihre Temperatur zu bestimmenden Substanz in Berührung gewesen ist,

553. Eispunktsbestimmung.

554. Siedepunktsbestimmung.

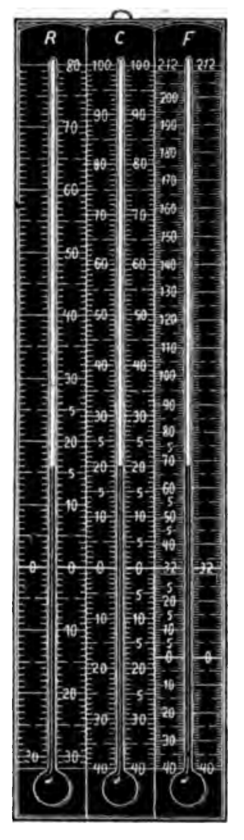
bis eine vollständige Ausgleichung eingetreten ist, auch als Maß für die Temperatur der Substanz angesehen werden; man würde also mit einem solchen Thermometer schon die Temperaturen zweier Substanzen vergleichen und angeben können, welche von beiden die höhere ist. Eine genauere quantitative Bestimmung oder Vergleichung wird aber erst ermöglicht durch Einführung unveränderlicher und jederzeit reproduzierbarer *Normaltemperaturen*, bei welchen ganz charakteristische Prozesse für bestimmte Substanzen stattfinden.

Newton hat zuerst im Anfang des vorigen Jahrhunderts eine auf feste Temperaturen begründete Thermometerskale eingeführt, und zwar als feste Temperaturen neben anderen die Temperatur des *schmelzenden Eises* und diejenige des *siedenden Wassers*. Dieser von Newton gemachte Fortschritt ist aber erst später zu allgemeiner Anwendung gelangt, und zwar durch die bekannten drei Physiker, deren Namen noch heute mit den gebräuchlichen Thermometerskalen verknüpft sind, nämlich durch G. D. *Fahrenheit* (geb. 1686 in Danzig, gest. 1736 in Holland) um das Jahr 1724, durch R. A. *Réaumur* (geb. 1683 zu La Rochelle in Frankreich, gest. 1757 in Paris) und durch A. *Celsius* (geb. 1701, gest. 1744 zu Upsala). Man ist also übereingekommen, als Normaltemperaturen zur Bestimmung zweier Fundamentalpunkte auf der Thermometerskale zu wählen die Temperaturen des unter einem bestimmten (Normal-) Drucke schmelzenden Eises und siedenden Wassers, welche sich nach den sorgfältigsten Beobachtungen als durchaus unveränderlich ergeben haben. Als Normaldruck gilt nach den Beschlüssen des meteorologischen Kongresses zu Rom im Jahre 1879 der Druck einer 760 mm hohen Quecksilbersäule vom spezifischen Gewichte 13,59593, deren Temperatur die des schmelzenden Eises ist, und die sich unter 45° geographischer Breite im Niveau der Meeresoberfläche befindet.

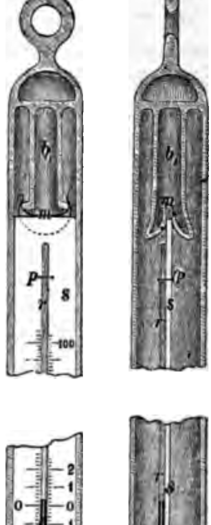
Zur Bestimmung des einen Fundamentalpunktes, des sogenannten *Eispunktes* oder Nullpunktes, der nur in sehr geringem Maße vom Druck abhängig ist, wird das Thermometer in ein trichterförmiges Gefäß gebracht, das mit reinem Schnee oder mit reinem, fein zerstoßenem oder besser fein geschabtem Eis gefüllt ist und unten mit einem Tubus für den Abfluß des Schmelzwassers versehen ist (Abb. 553). Das Thermometer wird in vertikaler Richtung bis nahe an den Eispunkt und darüber sorgfältig und fest eingebettet, so daß nur ein kleiner Raum für die Ablesung frei bleibt; man wartet dann hinreichend lange Zeit, bis ein konstanter Stand des Quecksilbers eingetreten ist, was mit Hilfe eines Ablesefernrohrs beobachtet wird; hierauf wird der Quecksilberstand in geeigneter Weise, etwa durch einen Diamantstrich, auf der Glasröhre markiert.

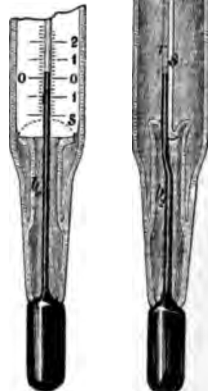
Die Temperatur, welche zur Bestimmung des zweiten Fundamentalpunktes, des sogenannten *Siedepunktes* gewählt wird, hängt in hohem Maße vom Luftdruck ab. Wasser siedet bekanntlich auf hohen Bergen bei niedrigerer Temperatur, als im Meeresniveau. Bei der Siedepunktbestimmung erweist sich daher für eine einheitliche Bestimmung die Festsetzung eines Normaldruckes und die jedesmalige Beobachtung des Barometerstandes als notwendig. Das Thermometer wird in einen von gesättigtem Wasserdampf erfüllten Dampfraum gebracht, und zwar wendet man nach dem Vorgang von *Rudberg* hierzu zweckmäßig ein langes cylinderförmiges Metallgefäß an, in dessen unterem Teile Wasser zum kräftigen Sieden gebracht wird (Abb. 554). Die aus dem Wasser aufsteigenden Dämpfe umspülen das Thermometer seiner ganzen Länge nach und treten dann nahe an dem oberen Teile des Cylinders in einen Zwischenraum, der von dem ersten Cylinder und einem zweiten Metallmantel gebildet wird, und dann erst aus einer an dem unteren Ende des Metallmantels befindlichen Seitenöffnung in die atmosphärische Luft. Der Metallmantel enthält ferner ein Ansatzröhrchen zur Aufnahme eines kleinen Wassermanometers, um einen im Innern des Cylinders etwa stattfindenden Überdruck erkennen zu lassen. Das Gefäß des Thermometers muß sich einige Zentimeter über dem Wasserniveau befinden, weil nach sorgfältigen Beobachtungen die Temperatur der aus dem Wasser aufsteigenden Dämpfe einzig und allein von dem auf der Wasseroberfläche lastenden Druck abhängig ist, dagegen die Temperatur des siedenden Wassers selbst durch die geringsten Beimengungen fremder Substanzen beeinflußt wird. Auch hier ist ebenso wie bei der Eispunktsbestimmung die Ablesung (am zweckmäßigsten mittels Fernrohrs) erst dann auszuführen, wenn man sicher ist, daß das Quecksilber einen unveränderlichen Stand zeigt.

Der so beobachtete und auf geeignete Weise markierte Siedepunkt entspricht dem Luftdruck, welcher zur Zeit der Beobachtung herrschte und mit Hilfe des Barometers zu bestimmen ist. Weicht dieser Druck von dem vorhin definierten Normaldruck ab, so muß der beobachtete Siedepunkt mit Hilfe der Regnaultschen Spannkraftstabellen, die den Zusammenhang zwischen Siedetemperatur und Druck numerisch darstellen, auf den Normaldruck reduziert werden. Der Abstand dieses letzteren Siedepunktes von dem Eispunkte heißt der **Fundamentalabstand** des Thermometers. Bei der Celsiusschen oder Centesimalskale wird dieser Fundamentalabstand in 100, bei der Réaumurschen Skale in 80 und bei der Fahrenheitschen in 180 gleiche Teile geteilt. Fügen wir hinzu, daß der Eispunkt bei der Celsiusschen und Réaumurschen Skale mit 0, bei der Fahrenheitschen dagegen mit 32 und die Siedepunkte dem entsprechend mit 100, 80 und 212 bezeichnet und daß die gleichmäßigen Teilungen auch über den Eispunkt hinaus nach der entgegengesetzten Seite fortgesetzt werden, so haben wir alle Daten zur Reduktion der drei verschiedenen Skalen auf einander. Die Gradwerte der Réaumurschen (° R.), Celsiusschen (° C.) und Fahrenheitschen (° F.) Skale verhalten sich also zu einander wie die Zahlen 4 : 5 : 9. Die Temperaturen über dem Nullpunkte werden mit dem Zeichen +, diejenigen unter dem Nullpunkte mit dem Zeichen — bezeichnet.




555. Zusammenstellung der drei Thermometerskalen.





556 u. 557. Normalthermometer von Fueß.

Bei der Fahrenheitschen Skale, die vorzugsweise in England (wo Fahrenheit eine Zeit lang gelebt hatte) und auch in Nordamerika fast ausschließlich in Gebrauch ist, liegt der Nullpunkt nicht bei dem Gefrierpunkt des Wassers, sondern bei derjenigen Temperatur, die Fahrenheit für die tiefste hielt, und welche er durch eine besondere Kältemischung erhielt, nämlich 32 Fahrenheitsche Grade unterhalb des Eispunktes, so daß die Angaben für Lufttemperaturen in der Fahrenheitschen Skale in der Regel durch +-Zahlen angegeben werden.

Um eine Gradangabe nach Fahrenheit auf die Skalen von Réaumur oder Celsius zurückzuführen, ist zunächst von der Fahrenheitschen Gradezahl die Zahl 32 abzuziehen und der Rest entweder mit dem Bruch $^4/_9$ oder mit dem Bruch $^5/_9$ zu multiplizieren. Der scheinbar sehr hohen Temperatur von 104° F. entspricht z. B. die Temperatur 32° R. und 40° C.; denn $104 - 32 = 72$; $72 \times {}^4/_9 = 32$ und $72 \times {}^5/_9 = 40$. Abb. 555 stellt die drei Thermometerskalen neben einander dar.

Die äußere Einrichtung der Thermometer kann den verschiedenen Zwecken gemäß sehr mannigfach abgeändert werden.

Die Teilung befindet sich in der Regel nicht auf der Thermometerröhre selbst, sondern auf einem an ihr befestigten Papier- oder besser Milchglasstreifen; Kapillare nebst Skale sind in einer Glasröhre eingeschlossen, die zweckmäßig auch oben zugeschmolzen ist. Die früher übliche Befestigungsart der Skale — die man übrigens bei Instrumenten minderwertiger Qualität auch jetzt noch anwendet — welche darin besteht, daß ihr oberes Ende durch einen Kork und ihr unteres Ende durch etwas Lack an der Umschlußröhre befestigt

wird, gibt häufig zu Fehlerquellen Veranlassung, indem der Lack bei höherer Temperatur erweicht und dadurch leicht eine Verschiebung der Skale gegen die Kapillare hervorbringt. In neuerer Zeit ist es dem Mechaniker R. Fueß gelungen, durch eine sinnreiche mechanische Konstruktion die Unverrückbarkeit der Skale gegen die Kapillare zu sichern. Aus den Abb. 556 und 557, welche ein Fueßsches Normalthermometer in der Vorder- und Seitenansicht darstellen, ist diese Konstruktion, die jetzt bei allen Präzisionsthermometern üblich ist, ersichtlich. Die Skale s s, die mittels feiner Platinschlingen p an der Kapillare r r befestigt ist, ist mit ihrem unteren Ende in einem kleinen Glastrichter b_2 fest gelagert, während gegen ihr oberes Ende ein gleich geformter Glastrichter b_1 unter Vermittelung einer Platinfeder m drückt.

Das Quecksilberthermometer ist wohl unstreitig wegen seiner Empfindlichkeit, wegen der Genauigkeit seiner Ablesung und der Bequemlichkeit seiner Anwendung das wichtigste und mit Recht verbreitetste Instrument zur Temperaturmessung. So einfach aber auch die Einrichtung und Handhabung des Quecksilberthermometers auf den ersten Blick erscheint, so mannigfach sind die Vorsichtsmaßregeln, die bei seinem Gebrauche zu berücksichtigen, und die Korrektionen, die man an seine Angaben anzubringen hat, wenn man eine sichere und genaue Temperaturbestimmung erzielen will. Um die Temperatur eines Körpers zu messen, muß das Gefäß des Thermometers denselben möglichst innig und hinreichend lange berühren, bis der Stand des Quecksilbers sich nicht mehr ändert. Auch muß jede andere Wärmequelle, welche störend einwirken könnte, z. B. auch die Körperwärme des Beobachters, möglichst eliminiert werden. Zur Bestimmung der Lufttemperatur setzt man das Thermometer in den Schatten an einen möglichst zugfreien Ort.

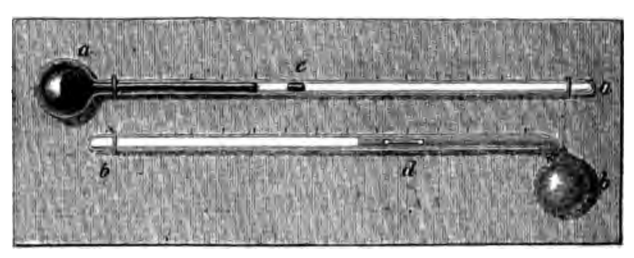
Kalibrierung. Würde die Kapillare an allen Stellen denselben Querschnitt besitzen und ferner die Teilung der Skale vollkommen gleichmäßig sein, so würden gleichen Ablesungsdifferenzen der Skale gleiche Volumina der Kapillare und demgemäß auch gleiche Temperaturdifferenzen entsprechen. Die Kapillare wird aber niemals an allen Stellen genau die gleiche Weite besitzen, und ebenso wird die Skale, wie alle Teilungen, mit Teilungsfehlern behaftet sein; es werden daher die aus den Ungleichheiten in der Weite der Kapillare und aus der Ungleichmäßigkeit der Teilung resultierenden Fehler, das sind die sogenannten Kaliberfehler und die Teilungsfehler, ermittelt werden müssen, um das jeder Ablesung entsprechende Volumen zu erhalten.

Zur Ermittelung der Kaliberkorrektionen trennt man nach dem Vorgang von Gay Lussac einen Quecksilberfaden von dem das Thermometergefäß füllenden Quecksilber los, indem man das Thermometer mit seinem oberen Ende nach unten neigt und einen gelinden Stoß gegen das letztere ausübt, oder indem man, nachdem man das Quecksilber aus dem Gefäße nach dem oberen Ende hin hat zufließen lassen, das Thermometer in seiner Mitte in horizontaler Lage hält und rasch mit demselben eine Schleuderbewegung ausführt: es reißt dann in der Regel infolge irgend eines an der inneren Glaswandung haftenden mikroskopischen Luftbläschens ein Quecksilberfaden ab, den man durch einfache Manipulationen beliebig verlängern oder verkürzen kann. Dieser Faden wird durch die Kapillarröhre der ganzen Länge nach hindurchgeschickt, indem die beiden Endpunkte des Fadens in der ersten untersten Lage in geeigneter Weise markiert werden, alsdann der Faden um seine ganze Länge vorwärts geschoben wird, so daß der neue Anfangspunkt genau mit dem vorigen Endpunkt zusammenfällt, die neue Lage der Endpunkte wieder markiert und dies Verfahren fortgesetzt, bis die ganze Röhre mit Marken versehen ist, deren Abstand stets genau einem und demselben Rauminhalt, nämlich demjenigen des Quecksilberfadens, entspricht. Mit Hilfe einer solchen, an einem geteilten Thermometer ausgeführten Kalibrierung erhält man die scheinbaren Kaliberfehler, welche an die Angaben des Thermometers angebracht werden müssen, um die entsprechenden wahren Volumina der Kapillare zu erhalten. In diesen scheinbaren Kaliberfehlern sind aber auch zugleich die Unregelmäßigkeiten der Teilung enthalten; für feinere Messungen ist daher auch noch die Kenntnis der Teilungsfehler der Skale erforderlich, um aus diesen, sowie den scheinbaren Kaliberfehlern die reinen Kaliberfehler, wie sie einer vollkommen gleichmäßigen Teilung entsprechen würden, abzuleiten. Manche Thermometerfabrikanten fertigen, falls die Kaliberfehler der Kapillare vorher bestimmt oder bekannt sind, die Teilung der Skale absichtlich

in der Weise ungleichmäßig an, daß für die Angaben des Thermometers die Ungleichheiten des Kalibers durch diejenigen der Teilung gerade aufgehoben werden. Methoden, welche für feinere Kalibrierungen vorzugsweise angewendet werden, sind von Gay-Lussac, von Hallström, von Bessel, von Neumann und vielen andern angegeben worden.

Fadenkorrektion. Eine weitere bei Temperaturbestimmungen mittels des Quecksilberthermometers zu berücksichtigende Fehlerquelle rührt daher, daß nur in den seltensten Fällen das Thermometer in allen seinen Teilen die zu bestimmende Temperatur der betreffenden Substanz oder des Bades besitzt, sondern daß dies meistens nur für das Gefäß und vielleicht für einen kleinen Teil der Kapillarröhre der Fall ist, z. B. wenn nur geringe Mengen der Substanz, deren Temperatur bestimmt werden soll, zur Verfügung stehen. An die Ablesungen des Thermometers wird dann die sogenannte Korrektion wegen des herausragenden Fadens oder kurz die Fadenkorrektion angebracht werden müssen, deren Größe proportional ist der Länge des herausragenden Fadens, der Temperaturdifferenz zwischen Quecksilbergefäß und Faden und dem relativen Wärmeausdehnungskoeffizienten (vgl. S. 433 ff.) von Quecksilber gegen Glas.

Nachwirkungsdilatationen. Es hat sich gezeigt, daß Thermometer, besonders aus thüringischem Glas älterer Zusammensetzung, im Laufe der Zeit Änderungen erfahren, die daher rühren, daß sich das Thermometergefäß nach der Anfertigung zwar langsam, aber lange Zeit hindurch noch zusammenzieht, so daß der Eispunkt in die Höhe rückt und die Temperaturangaben zu hoch sind. Es empfiehlt sich daher, Thermometer nicht unmittelbar nach der Anfertigung in Gebrauch zu nehmen und die Fundamentalpunkte erst längere Zeit nachher zu bestimmen und auch später von Zeit zu Zeit zu kontrollieren.



558. Maximum- und Minimumthermometer.

Von diesen dauernden Nachwirkungserscheinungen sind noch zu unterscheiden vorübergehende Änderungen, welche das Volumen des Quecksilbergefäßes infolge der verschiedenen Temperaturen, denen es ausgesetzt war, erleidet, und welche sich vorzugsweise in den Verrückungen des Eispunktes zeigen. Wird ein Thermometer nach seiner Eispunktbestimmung vorübergehend einer höheren Temperatur ausgesetzt und hernach von neuem sein Eispunkt bestimmt, so vergeht eine gewisse Zeit, ehe das erweiterte Gefäß sein ursprüngliches Volumen wieder annimmt, der Eispunkt wird infolgedessen deprimiert, und der Betrag der Depression ist für verschiedene Glassorten verschieden und um so größer, je höher die vorangegangene Erwärmung war. Man pflegt deshalb als unteren Fundamentalpunkt eines Thermometers den deprimierten Eispunkt anzunehmen, welchen das Thermometer nach einer unmittelbar vorhergegangenen Siedepunktbestimmung zeigt. Erst in der neueren Zeit hat man sich eingehender mit der Untersuchung dieser für die Wissenschaft wie für die Praxis wichtigen thermischen Nachwirkungen des Glases beschäftigt und gefunden, daß dieselben von der chemischen Zusammensetzung der Glassorte abhängen, und zwar, daß sie sehr bedeutend sind bei Glassorten, die Natron und Kali in nahezu gleicher Menge, und gering bei Glassorten, die entweder nur Kali oder nur Natron enthalten. In neuerer Zeit werden nun von den Gebr. Schott in Jena Glassorten der letzteren Art hergestellt, die unter dem Namen Jenenser Glas bekannt sind, bei welchen die Nachwirkungsdilatationen nach Erwärmungen bis zu 100° von verschwindender Größe sind, so daß jetzt bessere Thermometer ausschließlich aus Jenenser Glas angefertigt werden.

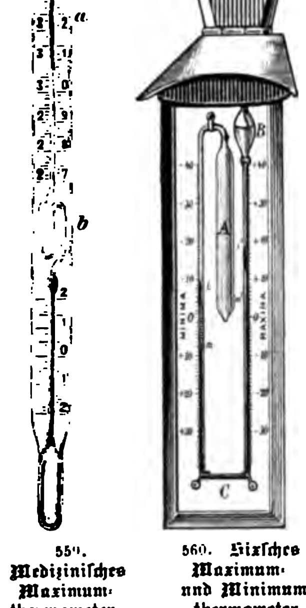
Die vorhin erwähnten, zum Teil schwierigen und zeitraubenden Untersuchungen bezüglich des Kalibers, der Teilung u. s. f. wird man nur für feinere Thermometer (Normalthermometer) ausführen; bei Instrumenten geringerer Qualität begnügt man sich damit, die Fundamentalpunkte zu bestimmen und sie in Temperaturintervallen von 5 zu 5° mit einem Normalthermometer zu vergleichen. Eine solche Vergleichung, Prüfung und

Beglaubigung von Thermometern führt gegen Entrichtung einer verhältnismäßig geringen Prüfungsgebühr die Physikalisch-Technische Reichsanstalt aus.

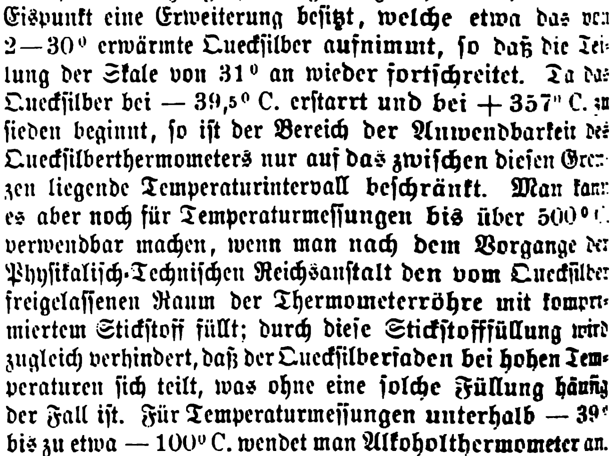
Nach der Mühe und Sorgfalt der Herstellung eines Thermometers richtet sich natürlich auch dessen Wert. Während man ein gewöhnliches Badethermometer mit Papierskale schon für 1 Mark erhalten kann, beträgt der Preis eines in 0,1° geteilten und von etwa — 5° bis + 105° reichenden Normalthermometers mit Patentkonstruktion 40—50 Mark. Die besten Instrumente in Deutschland liefert R. Fueß (vorm. J. G. Greiner jr. & Geißler) in Steglitz bei Berlin, ferner Geißler in Bonn.

Die Grenzen für die Thermometerskalen sind je nach dem Zwecke, denen die Instrumente dienen sollen, engere oder weitere. Während Thermometer für den Hausbedarf z. B. den Siedepunkt des Wassers ebenso gut wie die strengste Winterkälte anzugeben im stande sein müssen, brauchen die Skalen derjenigen Thermometer, deren sich die Ärzte zur Bestimmung der Temperatur des menschlichen Körpers bedienen, nur wenige Grade über und unter der Mitteltemperatur (etwa um 36° nach Celsius) zu umfassen.

Zweckmäßig aber ist es, wenn auch ärztliche Thermometer, die in 0,1° C. geteilt sein müssen, behufs Kontrolle wenigstens den Eispunkt angeben und ihre Kapillare, um eine zu große Länge einzuschränken, über dem Eispunkt eine Erweiterung besitzt, welche etwa das von 2—30° erwärmte Quecksilber aufnimmt, so daß die Teilung der Skale von 31° an wieder fortschreitet. Da das Quecksilber bei — 39,5° C. erstarrt und bei + 357° C. zu sieden beginnt, so ist der Bereich der Anwendbarkeit des Quecksilberthermometers nur auf das zwischen diesen Grenzen liegende Temperaturintervall beschränkt. Man kann es aber noch für Temperaturmessungen bis über 500° C. verwendbar machen, wenn man nach dem Vorgange der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt den vom Quecksilber freigelassenen Raum der Thermometerröhre mit komprimiertem Stickstoff füllt; durch diese Stickstofffüllung wird zugleich verhindert, daß der Quecksilberfaden bei hohen Temperaturen sich teilt, was ohne eine solche Füllung häufig der Fall ist. Für Temperaturmessungen unterhalb — 39° bis zu etwa — 100° C. wendet man Alkoholthermometer an.



559. Medizinisches Maximumthermometer.

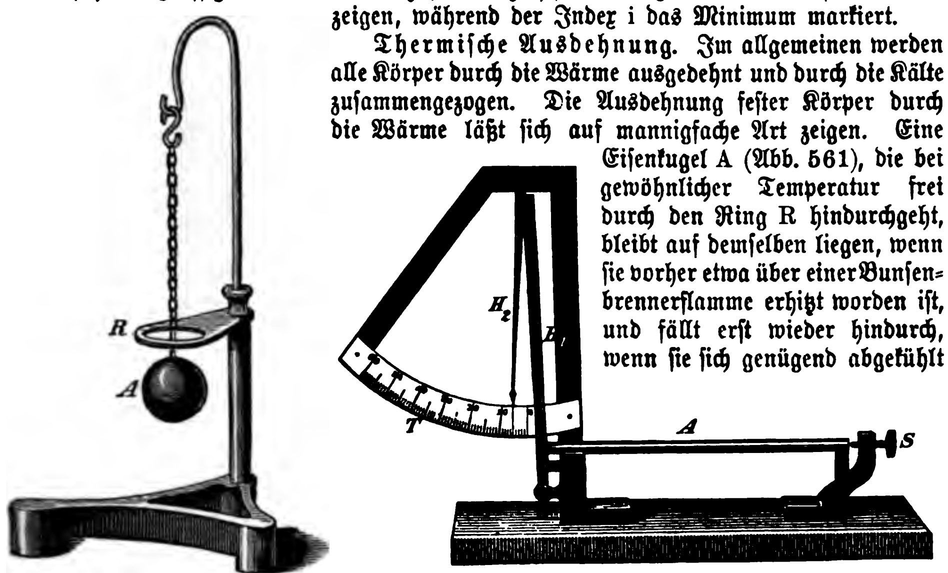


560. Sixsches Maximum- und Minimumthermometer.

Maximum- und Minimumthermometer. Für gewisse Zwecke der Beobachtung hat man Thermometer konstruiert, die den tiefsten oder höchsten Stand erkennen lassen, den sie während irgend eines Zeitintervalls gehabt haben. Man nennt dieselben Maximum- und Minimumthermometer. Das bekannteste derartige Instrument ist das Rutherfordsche (Abb. 558). Zwei Thermometer sind auf einem Brettchen in horizontaler Lage befestigt, das eine a a mit Quecksilberfüllung für hohe, das andere b b mit Alkoholfüllung für niedrige Temperaturen. In dem ersteren liegt ein kleiner Stahlstift c, welchen das Quecksilber bei seiner Ausdehnung vor sich herschiebt, beim Zurückgehen aber liegen läßt: er zeigt somit den höchsten Stand des Quecksilbers an. In dem Alkoholthermometer befindet sich ein leichtes, mit zwei Knöpfchen versehenes Glasstäbchen d, das vom Alkohol bei seiner Zusammenziehung mitgenommen wird, welches aber, wenn der Alkohol sich ausdehnt, an seiner Stelle liegen bleibt, indem der Alkohol an ihm vorbeifließt. Das vordere Knöpfchen des Glasstäbchens zeigt also die niedrigste Temperatur an, welche stattgefunden hat. Durch Neigung des Brettchens, resp. mit Hilfe eines Magnets können Glasstäbchen und Stahlstift wieder bis zur Alkohol-, resp. Quecksilberfläche herangeschoben werden, wodurch das Instrument für eine neue Messung anzuwenden ist.

In Abb. 559 ist ein neueres medizinisches Maximumthermometer dargestellt, bei dem ein Quecksilberfaden a durch ein Luftbläschen b vom Quecksilber des Gefäßes und der unteren Kapillare losgetrennt ist. Bei steigender Temperatur wird der abgetrennte Faden vorgeschoben, bei sinkender bleibt er liegen; er zeigt somit die höchste Temperatur an, die stattgefunden hat. Durch eine sanfte Schleuderbewegung kann man den Faden wieder in eine tiefere Lage bringen. Abb. 560 zeigt das in neuerer Zeit vielfach in Gebrauch befindliche Sixsche Maximum- und Minimumthermometer. A C B ist eine Uförmig gebogene Glasröhre mit einem größeren Glasgefäß A und einem kleineren B. m m' ist eine Quecksilbersäule; der Raum A bei m und ebenso ein Teil des Raumes B bei m' ist mit Alkohol oder mit Kreosot und Wasser gefüllt; i und i' sind zwei kleine stählerne in der Thermometerröhre verschiebbare Stifte. Dehnt sich die Flüssigkeit in A aus, so wird die Quecksilbersäule m C m' und mit ihr der Index i' nach B zu verschoben; i' wird also, wenn sich die Flüssigkeit wieder in A zusammenzieht, das Maximum der Temperatur anzeigen, während der Index i das Minimum markiert.

Thermische Ausdehnung. Im allgemeinen werden alle Körper durch die Wärme ausgedehnt und durch die Kälte zusammengezogen. Die Ausdehnung fester Körper durch die Wärme läßt sich auf mannigfache Art zeigen. Eine Eisenkugel A (Abb. 561), die bei gewöhnlicher Temperatur frei durch den Ring R hindurchgeht, bleibt auf demselben liegen, wenn sie vorher etwa über einer Bunsenbrennerflamme erhitzt worden ist, und fällt erst wieder hindurch, wenn sie sich genügend abgekühlt hat.



561. Ausdehnung durch die Wärme. 562. Hebelpyrometer.

Wohl jeder hat die Beobachtung gemacht, daß Eisenbahnschienen nicht unmittelbar an einander stoßen, sondern daß sich stets eine gewisse Luftstrecke zwischen ihnen befindet, um eine freie Ausdehnung bei der Erwärmung zu ermöglichen. Die Kraft, mit welcher die Ausdehnung bei der Erwärmung und die Zusammenziehung bei der Abkühlung vor sich geht, läßt sich durch nichts überwinden. Technisch ist die Kraft der Zusammenziehung während der Abkühlung mit Erfolg verwertet worden, um starke Mauern eines Gebäudes, die sich nach außen geneigt hatten, wieder parallel zu richten. Zu diesem Zwecke wurden parallele Eisenstangen quer durch die Mauern gezogen, dieselben stark erwärmt und dann fest verschraubt. Bei der Abkühlung zogen sich die Eisenstangen mit solcher Kraft zusammen, daß durch Wiederholung des Verfahrens ein Geraderichten der Mauern ermöglicht wurde.

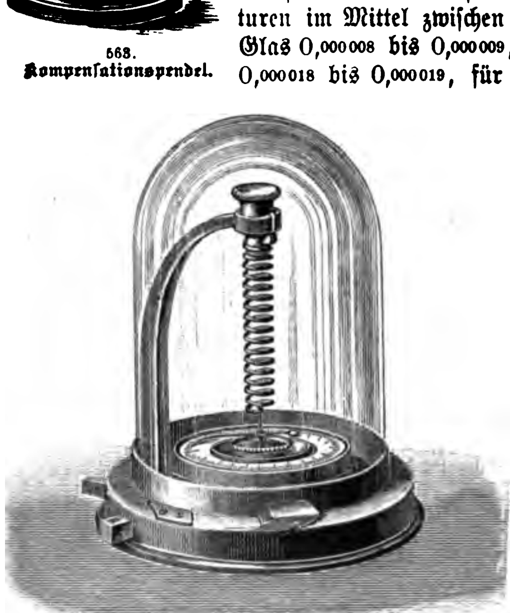
Die Größe der Ausdehnung hängt von der Natur der Substanz ab, ist also für die gleiche Temperaturerhöhung bei den verschiedenen Substanzen verschieden. Nach der mechanischen Wärmetheorie, nach welcher die Wärme als eine Art von Bewegung aufzufassen ist, haben wir uns die Ausdehnung eines Körpers durch die Wärme in der Art zu erklären, daß die Atome und Moleküle des Körpers in schwingender Bewegung sind, und daß ihre Schwingungsweite mit wachsender Temperatur zunimmt und für die verschiedenen Körper verschieden ist. Man nennt die Größe, um welche sich die Längeneinheit (also 1 m) einer Substanz in einem bestimmten Temperaturintervall pro 1 ° C.

Temperaturerhöhung verlängert, den **linearen Ausdehnungskoeffizienten** der Substanz innerhalb dieses Temperaturintervalls.

Ist l_t die Länge eines Stabes bei der Temperatur t° C. und l_0 diejenige bei der Normaltemperatur 0° C., ferner α der Ausdehnungskoeffizient des Materials, aus dem der Stab besteht, so gilt die Gleichung $l_t = l_0 (1 + \alpha t)$ und umgekehrt $l_0 = l_t (1 - \alpha t)$. Mit Hilfe des in Abb. 562 dargestellten **Hebelpyrometers** lassen sich die Ausdehnungskoeffizienten von Stäben aus verschiedenen Materialien bestimmen, resp. mit einander vergleichen. Der Stab A, dessen Ausdehnung bestimmt werden soll, drückt mit dem einen Ende gegen die Schraube S, mit dem anderen gegen den Hebel H_1 und zwar nahe an seinem Drehpunkt O, so daß das obere Ende des Hebels schon bei geringer Ausdehnung des Stabes einen beträchtlichen Weg zurücklegt, welcher durch eine zweite Hebelübertragung noch vergrößert und an der empirisch graduierten Skale T mittels der unteren Spitze des Fühlhebels H_2 abgelesen wird. Der Stab A kann dabei in ein geeignetes Gefäß gebracht werden, das mit kleingestoßenem Eis gefüllt resp. als Wasser- oder Dampfbad für verschiedene Temperaturen verwendet werden kann. Ein Präcisionsmeßapparat zur Bestimmung der Ausdehnung von Maßstäben ist bereits früher (vgl. S. 217 u. 218) beschrieben worden. Im allgemeinen wächst der Wert des Ausdehnungskoeffizienten mit steigender Temperatur; für die meisten praktischen Zwecke pflegt man ihn für die mittleren Temperaturen als konstant zu betrachten. Er beträgt für Temperaturen im Mittel zwischen 0 und 100° C. für Eisen 0,000012, für Glas 0,000008 bis 0,000009, ebenso für Platin 0,000009, für Messing 0,000018 bis 0,000019, für Zink 0,000029, für Kupfer 0,000017, für Quecksilber 0,000181; eine Quecksilbersäule von 1 m Länge dehnt sich also bei einer Temperaturerhöhung von 1° C. um 0,181 mm aus. Die Thatsache, daß Glas und Platin fast den gleichen Ausdehnungskoeffizienten haben, ist für den Physiker wie für den Chemiker von großer Bedeutung, weil darauf die Möglichkeit beruht, Platindrähte in Glas einzuschmelzen, ohne daß bei der Abkühlung und Zusammenziehung ein Zerspringen des Glases eintritt.



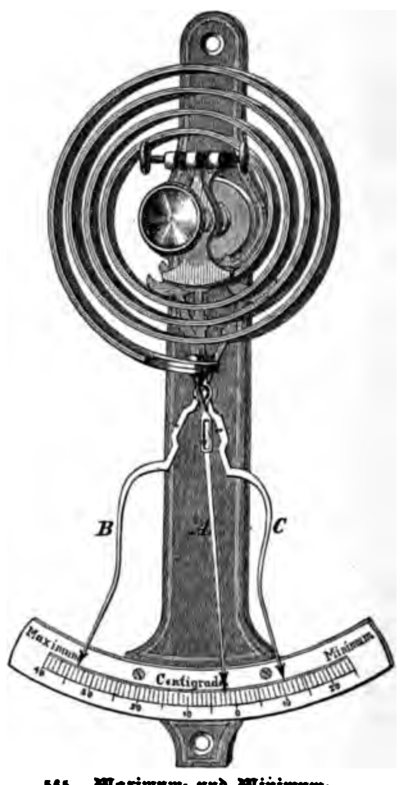
563. Kompensationspendel.


564. Breguetsches Metallthermometer.

Kompensationspendel und -Streifen. Metallthermometer. Auf der verschiedenen Ausdehnung der Metalle beruht die Einrichtung des **Kompensationspendels** (Abb. 563). Es besteht aus drei Eisen- und zwei Zinkstangen. Durch die nach unten hin stattfindende Ausdehnung der Eisenstangen EEE senkt sich die Pendellinse P, wodurch die Schwingungsdauer vergrößert wird, durch die nach oben hin stattfindende Ausdehnung der Zinkstangen ZZ wird die Pendellinse gehoben und dadurch wieder die Schwingungsdauer verkleinert. Wählt man die Gesamtlängen der Stangen so, daß sie sich umgekehrt wie ihre Ausdehnungskoeffizienten verhalten, so wird die Pendellänge und damit auch die Schwingungsdauer des Pendels durch Temperaturänderungen nicht beeinflußt.

Ein Kompensationsstreifen besteht aus zwei gleichgeformten, der Länge nach an einander genieteten oder gelöteten Streifen verschiedener Metalle, z. B. Messing und Stahl. Bei einer bestimmten Temperatur t_0 ist er gerade, bei höherer Temperatur krümmt er sich, und zwar bildet das Messing, weil es sich stärker als Stahl ausdehnt, die konvexe Seite und umgekehrt bei einer Abkühlung unterhalb der Temperatur t_0 die konkave Seite des Streifens. Solche Kompensationsstreifen werden bei den Unruhen der Chronometer benutzt, um deren Gang unabhängig von der Temperatur zu machen. Die Breguetschen Metallthermometer (Abb. 564) bestehen gleichfalls aus solchen spiralförmig aufgerollten Kompensationsstreifen aus Platin und Silber, die sich bei steigender oder fallender Temperatur nach der einen oder der anderen Seite krümmen. Die Größe der Krümmung kann entweder direkt oder mit Hilfe eines Fühlhebelmechanismus oder eines Zahnradgetriebes auf einen über einer empirisch graduierten Skale einspielenden Zeiger übertragen werden und bietet so ein Maß für die Temperatur.

Abb. 565 stellt ein Maximum- und Minimum-Metallthermometer dar. Die beiden Zeiger B und C sind unabhängig von dem Kompensationsstreifen angeordnet und werden von dem eigentlichen Thermometerzeiger A vorgeschoben, während sie bei dessen Rückgang stehen bleiben und so die höchste, resp. tiefste Temperatur markieren. Nach der Ablesung können sie wieder dem Mittelzeiger nachgeführt werden. Die Metallthermometer haben aber keinen sehr hohen wissenschaftlichen Wert, weil das thermische Verhalten der Metalle zu kompliziert und noch zu wenig erforscht ist, und weil die Angaben von Metallthermometern nicht bloß durch Änderungen der Elastizität, die mit der Zeit und durch atmosphärische Einflüsse hervorgerufen werden, sondern auch durch das Auftreten von Thermoströmen in nicht unerheblichem Maße verfälscht werden können.



565. Maximum- und Minimum-Metallthermometer.

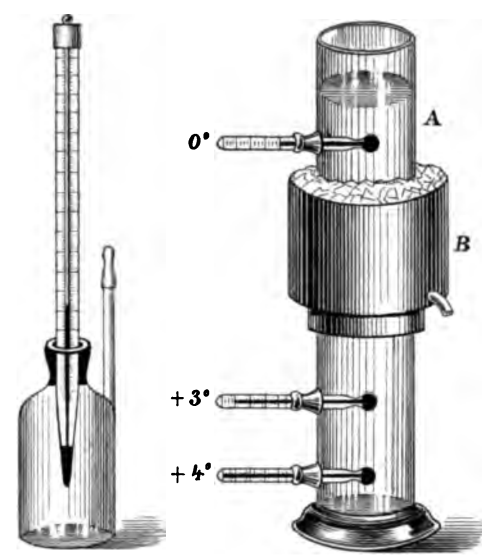
Auf die Ausdehnung fester Substanzen, z. B. von Graphit, bei erhöhter Temperatur gründen sich die Pyrometer oder Hitzemesser, welche man zur Messung hoher Hitzegrade, z. B. bei Hüttenprozessen, in Porzellanöfen u. s. w. konstruiert hat.

Um die Ausdehnung, welche das Volumen eines isotropen, d. h. nach allen Richtungen gleichartigen Körpers durch Temperaturerhöhung erfährt, zu bestimmen, hat man seinen kubischen Ausdehnungskoeffizienten in Rechnung zu ziehen, d. i. die Größe, um welche sich die Volumeneinheit des Körpers pro 1° C. Temperaturerhöhung ausdehnt. Der kubische Ausdehnungskoeffizient ist seinem Betrage nach das Dreifache des linearen.

Wir haben gesehen, daß die verschiedenen Körper sich durch die Wärme verschieden ausdehnen. Es kann sich aber auch ein und derselbe Körper nach verschiedenen Richtungen verschieden ausdehnen, die Schwingungsweiten seiner Moleküle können nach gewissen Richtungen freiere und größere sein, als nach anderen (anisotrope Körper). Dies ist bei vielen Krystallen der Fall. Die Ausdehnung des Kalkspats ist z. B., wie der berühmte Krystallograph Mitscherlich gefunden hat, in Richtung seiner krystallographischen Achse größer als in jeder anderen Richtung. Ähnliches findet bei vielen organischen Geweben statt. Gespannte Kautschukstreifen oder eine Kautschukröhre zeigen ein sehr merkwürdiges Verhalten; sie verkürzen sich nämlich, wie zuerst Joule experimentell gezeigt hat, bei der Erwärmung.

Ausdehnung der Flüssigkeiten. Ebenso wie feste Körper werden auch flüssige und gasförmige Körper durch die Wärme ausgedehnt, und zwar wächst im allgemeinen der kubische Ausdehnungskoeffizient der Flüssigkeiten mit zunehmender Temperatur. Er läßt sich indirekt aus der scheinbaren Ausdehnung ermitteln, welche die Flüssigkeit in einem Gefäße von bekannter Ausdehnung erfährt. Man benutzt zu diesem Zwecke ein sogenanntes Pyknometer, d. i. ein mit einem eingeschliffenen Stöpsel versehenes Glasfläschchen (Abb. 566), wie es zur Bestimmung des spezifischen Gewichts von Flüssigkeiten benutzt wird, und bestimmt durch Wägung die Flüssigkeitsmassen, welche es bei den Temperaturen faßt, für deren Intervall der Ausdehnungskoeffizient bestimmt werden soll.

Direkt, also unabhängig von der Ausdehnung des Gefäßes, läßt sich die wahre Ausdehnung einer Flüssigkeit bestimmen mittels der Methode der kommunizierenden Röhren, die von Dulong und Petit und später von Regnault zur Bestimmung der absoluten Ausdehnung des Quecksilbers angewandt worden ist. Die beiden vertikalen Schenkel a a und b b einer durch das horizontale Rohr c c mit einander verbundenen, mit Quecksilber gefüllten U-Röhre (Abb. 568) befinden sich in zwei Glasgefäßen A und B, von denen das eine mit kleingestoßenem Eis, das andere mit einer auf verschiedene Temperaturen t zu bringenden Flüssigkeit gefüllt wird. Aus der infolge der Temperaturdifferenz $t^0 - 0^0$ C. stattfindenden Höhendifferenz $H_t - H_0$ der beiden Quecksilbersäulen ergibt sich der kubische Ausdehnungskoeffizient α des Quecksilbers durch die einfache Formel $\alpha = \frac{H_t - H_0}{H_0\, t}$. Die Ausmessung der Höhen H_0 und H_t erfolgte mittels des zu diesem Zwecke von Dulong und Petit konstruierten, auf S. 214 ff. bereits beschriebenen Kathetometers.



566. Pyknometer. 567. Dichtemaximum des Wassers.

Wasser dehnt sich sehr ungleichmäßig und von etwa 15° C. ab stärker aus als Quecksilber.

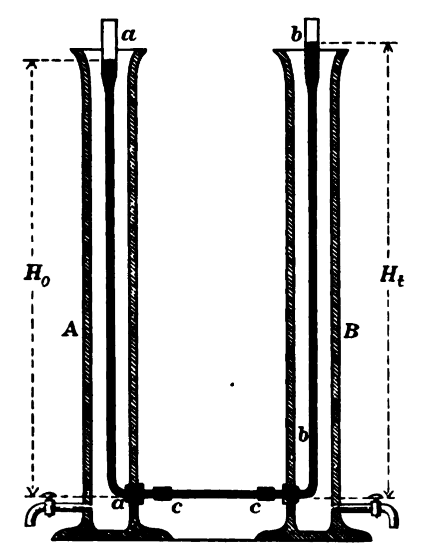
Der Ausdehnungskoeffizient	des	Wassers	bei	15° C.	ist	0,00018,
"	"	"	"	30°	"	0,00032,
"	"	Alkohols	"	15°	"	0,00107,
"	"	Äthers	"	15°	"	0,00158.

Alkohol dehnt sich also stärker aus als Wasser, und Substanzen, die flüchtiger sind wie Alkohol, noch stärker als dieser.

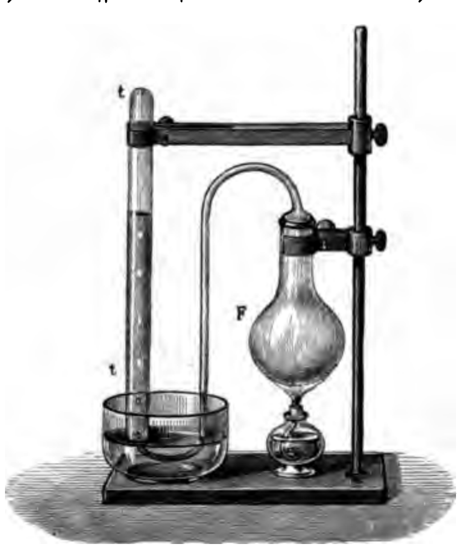
Das Verhalten einer großen Anzahl von Flüssigkeiten könnte zu der Schlußfolgerung verleiten, daß mit einer Temperaturerhöhung stets eine Volumenvergrößerung verbunden ist. Dies ist aber nicht der Fall; es findet eine wichtige Ausnahme von der allgemeinen Regel statt: Wasser zeigt ein anomales Verhalten. Füllt man einen Glaskolben, dessen Hals in eine enge lange Röhre ausmündet, mit Wasser von Zimmertemperatur und setzt ihn alsdann in ein Wasserbad, das auf der konstanten Temperatur von 0° C. erhalten wird, so beobachtet man ein allmähliches Sinken der Wassersäule infolge der Zusammenziehung des Wassers. Diese Zusammenziehung findet aber nur so lange statt, bis das Wasser im Kolben die Temperatur von + 4° C. erreicht hat; von da ab bleibt die Säule einen Augenblick unbeweglich, um bei weiterer Abkühlung bis zu 0° C. wieder zu steigen. Das Wasser besitzt also bei + 4° C. das Maximum seiner Dichtigkeit.

In dem mit Wasser gefüllten und einem Eismantel B umgebenen Glasgefäß A (Abb. 568) zeigt das oberste der drei horizontalen Thermometer die tiefste Temperatur (0° C.), das unterste die höchste Temperatur (+ 4° C.) an, weil das unter 4° C. abgekühlte Wasser spezifisch leichter ist, als das Wasser von + 4° C. und deshalb oben schwimmt.

Bei der Erstarrung des Wassers zu Eis findet eine plötzliche und sehr bedeutende Volumenzunahme statt und zwar mit einer Kraft, welche im stande ist, die stärksten eisernen Röhren zu zersprengen — eine unliebsame Erfahrung, die wir nur zu häufig nach anhaltendem Froste an den Wasserzuleitungsröhren unserer Häuser zu machen Gelegenheit haben. Da das Eis infolge der beträchtlichen (etwa $^1/_8$ betragenden) Ausdehnung spezifisch leichter ist als das Wasser, aus dem es sich bildet, schwimmt es auf demselben. Auf diesem anomalen Verhalten des Wassers beruht die für den Haushalt der Natur so wichtige Thatsache, daß das Wasser unserer Flüsse und Seen von der Oberfläche aus zufriert, während es in der Tiefe noch die Temperatur von 4° C. besitzt. In seinem klassischen Werke „Die Wärme betrachtet als eine Art der Bewegung“ citiert Tyndall die Worte, mit denen Rumford seiner Bewunderung für diese Einrichtung der Natur Ausdruck verleiht: „Denken Sie sich einen See unter einem klaren Winterhimmel. Das Wasser an der Oberfläche wird kalt, zieht sich zusammen, wird dadurch schwerer und sinkt vermöge seines größeren Gewichts in die Tiefe, während das aufsteigende, leichtere Wasser an seine Stelle tritt. Nach einer




568. Apparat zur Bestimmung der Ausdehnung des Quecksilbers.



569. Ausdehnung der Gase bei konstantem Druck.

Weile wird auch dieses Wasser kalt und sinkt unter. Auf diese Weise ist ein Kreislauf hergestellt, wobei das kalte, dichte Wasser untersinkt, und das wärmere und leichtere an die Oberfläche steigt. Denken wir uns diesen Vorgang fortgesetzt, auch nachdem sich bereits die ersten Eiskrusten an der Oberfläche gebildet haben. Das Eis würde sinken, und dieser Prozeß würde so lange andauern, bis das ganze Wasser des Sees fest geworden ist. Die Folge davon müßte der Tod jedes lebenden Wesens im Wasser sein. Aber gerade, wenn die Dinge kritisch werden, tritt die Natur aus ihrem gewöhnlichen Gange heraus, veranlaßt das Wasser, sich bei der Abkühlung auszudehnen, und läßt das kalte Wasser wie Öl auf der Oberfläche des unteren wärmeren schwimmen. Es tritt Eisbildung ein; aber die feste Substanz ist viel leichter als die darunter liegende flüssige, und das Eis bildet ein schützendes Dach über den lebenden Wesen der Tiefe.“

Ausdehnung der Gase. Die Ausdehnung der Luft läßt sich durch folgenden einfachen Versuch zeigen: Von einem Glaskolben F (Abb. 569), der nur Luft enthält, führt ein zweimal gebogenes Glasrohr zu einer mit Wasser gefüllten und unter Wasser umgestülpten Glasröhre t t, in welcher die Wassersäule durch den Atmosphärendruck festgehalten wird. Wird nun der Glaskolben erwärmt, so dehnt sich die Luft in demselben aus, Luftblasen steigen in die Röhre t t auf, verdrängen die Flüssigkeit aus ihr, und das Volumen der verdrängten Flüssigkeit bietet ein Maß für die Ausdehnung des Gases. Gay-Lussac hat

die wichtige Entdeckung gemacht, daß alle sogenannten permanenten Gase sich fast genau um den gleichen Bruchteil des bei 0° C. von ihnen eingenommenen Volumens ausdehnen, wenn sie bei konstantem Druck um 1° C. erwärmt werden; und zwar beträgt konstante dieser Bruchteil, der **mittlere Ausdehnungskoeffizient der Gase** $\alpha = 0{,}00367$ oder abgekürzt $= \frac{1}{273}$.

Ferner haben Gay-Lussac und nach ihm Dulong und Petit gefunden, daß diese Ausdehnung der Temperaturzunahme proportional ist, solange die Gase von dem Punkte, bei welchem sie durch gemeinsame Wirkung von Druck und Kälte flüssig gemacht werden können, hinreichend weit entfernt sind. Hieraus folgt weiter, daß zwei Gase bei gleichen Temperaturen und gleichem Drucke stets dasselbe Dichtigkeitsverhältnis zu einander haben.



570. Joseph Louis Gay-Lussac.

Sind v_0 und v die Volumina bei demselben Drucke und bei den Temperaturen 0° und t° C., so lautet das Gay-Lussacsche Gesetz

$$v = v_0 (1 + \alpha t) = v_0 (1 + 0{,}00367 \,.\, t).$$

Die Ausdehnung der Gase ist noch nach einer anderen, nachher zu besprechenden Methode zuerst von Rudberg und nachher fast gleichzeitig in ausgedehnter und sehr sorgfältiger Weise von Magnus und von Regnault untersucht worden.

Verbindung des Mariotteschen mit dem Gay-Lussacschen Gesetz. Wie bereits im ersten Teile dieses Buches erwähnt ist, verhalten sich bei gleicher Temperatur die Volumina eines Gases umgekehrt wie die Drucke (Boyle-Mariottesches Gesetz).

Ist also v_0 das Volumen einer Gasmasse beim Normaldruck p_0 und der Normaltemp. 0° C.,
ferner v_1 „ „ „ „ „ Drucke p „ „ Temperatur 0°,
endlich v „ „ „ „ „ „ p „ „ „ t°,
so lautet das Boyle-Mariottesche Gesetz:

$$v_0 : v_1 = p : p_0, \text{ oder } p\,v_1 = p_0\,v_0 = \text{konstant}.$$

Nach dem Gay-Lussacschen Gesetz ist aber

$$v = v_1 (1 + \alpha t), \text{ oder } v_1 = \frac{v}{1 + \alpha t}.$$

Setzt man diesen Wert für v_1 in die vorige Gleichung ein, so erhält man das Mariottesche Gesetz mit dem Gay-Lussacschen vereinigt in der Form

$$\frac{p\,v}{1 + \alpha t} = p_0\,v_0 = \text{konstant},$$

aus welcher sich ergibt

$$v_0 = \frac{p\,v}{p_0 (1 + \alpha t)}.$$

Diese Formel, auf welche unter anderem die Theorie der Gaskraft- und Heißluftmaschinen beruht, wird sehr häufig benutzt, um das bei irgend einer Temperatur t und

irgend einem Drucke p beobachtete Volumen v eines Gases auf den Normaldruck 760 mm und die Normaltemperatur 0° C. zu reduzieren.

Es möge an dieser Stelle, einem im ersten Teile dieses Werkes bei der Besprechung des Luftdruckes gegebenen Hinweis gemäß, die Beschreibung der Einrichtung und Anwendung des Quecksilberbarometers eingeschaltet werden.

Torricelli, der bedeutendste Schüler Galileis, hat zuerst durch das Experiment den Beweis für die Existenz und die Wirkung des Luftdrucks geliefert, und die Wissenschaft feiert ihn daher mit Recht — mögen auch Galilei und Descartes den Gedanken früher gehabt haben — als den Entdecker eines neuen Gesetzes und als den Erfinder des Barometers. Im Jahre 1643 oder 1644 machte Torricelli in Florenz den berühmten Versuch, welcher jetzt noch von den Physikern in derselben Weise angestellt wird. Er nahm eine starke Glasröhre von etwa 1 m Länge, die an einem Ende zugeschmolzen und so weit war, daß die untere Öffnung mit dem Finger verschlossen werden konnte. Diese Röhre füllte er bis oben hin mit Quecksilber, verschloß sie mit dem Finger, so daß beim Umkehren kein Quecksilber herausfließen konnte, brachte so das untere Ende in ein mit Quecksilber angefülltes Gefäß, unter den Spiegel der Flüssigkeit und zog dann den Finger von der Öffnung weg (Abb. 573). Es zeigte sich, daß das Quecksilber im Innern der Röhre nur bis zu einem gewissen Punkte heruntersank, auf dem es stehen blieb, so oft er auch das Experiment wiederholte; dieser Punkt lag über dem Spiegel b immer gleich hoch bei a. Die Röhre mochte 1 oder 2 m lang sein, die Quecksilbersäule hatte immer eine vertikale Höhe von ungefähr 76 cm. Der obere Raum der Röhre enthielt kein Quecksilber; er war leer, und die Luft hatte keinen Zutritt zu ihm. Noch heute heißt dieser leere Raum dem Entdecker zu Ehren die Torricellische Leere oder das Torricellische Vakuum. Die Quecksilbersäule ba hält dem auf die Quecksilberoberfläche b ausgeübten Luftdruck das Gleichgewicht, und ihre Länge bietet ein Maß für denselben. Eine solche Vorrichtung ist die einfachste Form eines Gefäßbarometers. So instruktiv und schön der Torricellische Versuch auch für Demonstrationszwecke ist, für genauere wissenschaftliche Beobachtungen ist ein auf diese Weise hergestelltes Barometer nicht genügend. Die Luft läßt sich durch diese einfache Manipulation nicht vollständig aus dem Innern der Glasröhre entfernen; sie haftet mit großer Hartnäckigkeit an den inneren Glaswänden, bringt einen Druck auf das Quecksilber innen hervor und bildet somit eine Fehlerquelle, welche nur beseitigt werden kann, indem man das Quecksilber in der Röhre während der Füllung auskocht, oder indem man zur Quecksilberfüllung die Quecksilberluftpumpe anwendet.



571. Heinrich Gustav Magnus.

Ferner ist für genauere Beobachtungen ein konstantes Niveau der Quecksilberoberfläche im Gefäße notwendig, von welchem aus die Länge der Quecksilbersäule zu messen ist. Bei sinkendem Luftdruck wird Quecksilber aus der Röhre in das Gefäß fließen, bei steigendem Luftdruck umgekehrt Quecksilber aus dem Gefäß in die Röhre aufsteigen; man

würde also in der beschriebenen Anordnung keinen konstanten Nullpunkt für die untere Ablesung haben, es sei denn, daß der Durchmesser des unteren Gefäßes so groß gewählt würde, daß durch das Sinken oder Steigen des Quecksilbers in der Röhre sein Quecksilberniveau nur in so geringem Grade beeinflußt wird, daß man die Niveauänderung ganz vernachlässigen könnte. So große Gefäße wären vielleicht für Instrumente, die ein für allemal eine feste Aufstellung haben, zweckmäßig anwendbar, nicht aber für solche, die transportiert werden, um auf Reisen Beobachtungen mit ihnen anzustellen.

Um diesem Übelstande abzuhelfen, hat der französische Mechaniker **Fortin** eine sinnreiche Einrichtung angegeben, die es ermöglicht, das Niveau im Gefäße stets auf denselben Punkt zu bringen, und deren Prinzip auch heute noch bei allen besseren Gefäßbarometern Anwendung findet. Der Boden des Gefäßes wird durch einen starken Lederbeutel ll (Abb. 574) gebildet, gegen welchen von unten her durch eine Schraube s ein Druck ausgeübt werden kann, so daß dadurch das in ihm enthaltene Quecksilber gehoben oder gesenkt werden kann, bis es die untere sehr feine Spitze eines in das Gefäß hineinragenden festen Elfenbeinstiftes r eben berührt. Diese Spitze bildet den Nullpunkt der auf der Metallhülse des Instruments aufgetragenen Maßstabteilung M (Abb. 575), an welcher mittels des Zahntriebes Z und der Visiervorrichtung V der Stand der oberen Quecksilberkuppe abgelesen wird. Die Barometerröhre ragt so tief in das Gefäß hinein, daß sie immer mit ihrer feinen Öffnung sich unter dem Spiegel des Quecksilbers befindet. Um das Barometer transportieren zu können, wird die Schraube s so weit angezogen, daß das Quecksilber sowohl die Röhre als das Gefäß bis an dessen obere Wandung erfüllt. Abb. 575 zeigt ein Fortinsches Barometer mit Aufhängevorrichtung für eine feste Aufstellung, Abb. 576 ein Instrument mit bequemem Stativ für Reisezwecke. Das Thermometer T dient zur Bestimmung der Temperatur des Quecksilbers, resp. des Maßstabes.


572. Evangelista Torricelli.

Bei einer zweiten Art von Barometern, welche wegen ihres heberförmig gekrümmten unteren Teiles **Heberbarometer** heißen, braucht man zur Messung des Luftdruckes kein konstantes unteres Niveau, indem man die Höhendifferenz der Quecksilbersäulen in den beiden Schenkeln abliest. Beide Schenkel, der offene a (Abb. 578) und der geschlossene b, in dessen oberem Teile sich das Vakuum bildet, müssen von genau gleicher Weite sein,

damit bei Schwankungen des Luftdrucks die Quecksilbersäule in dem einen Schenkel genau so viel steigt, als sie im anderen fällt, und umgekehrt.

Besondere Mühe hat man darauf verwandt, die Heberbarometer so zu konstruieren, daß sie bequem und sicher transportiert werden können. Sie werden in starke Kapseln eingeschlossen, um die Röhre während des Transports vor dem Zerbrechen zu schützen. Die von Gay-Lussac ursprünglich der Barometerröhre gegebene Form ist aus Abb. 578 ersichtlich. Der kürzere Schenkel ist oben gleichfalls geschlossen und hat nur bei a eine kapillare Öffnung, die groß genug ist, um den Zutritt der Luft und die Einwirkungen des wechselnden Luftdrucks auf das Quecksilber nicht zu hindern, aber zu klein ist, als daß das Quecksilber aus ihr ausfließen könnte. Das Instrument läßt sich deshalb leicht umkehren und in eine für den Transport bequeme Lage bringen. Um hernach das Barometer zur Beobachtung wieder umkehren zu können, ohne daß Luft in den oberen Teil des längeren Schenkels eintreten kann, hat Bunten an der Barometerröhre die in Abb. 580 dargestellte Sicherung b angebracht.


578. Der Torricellische Versuch.

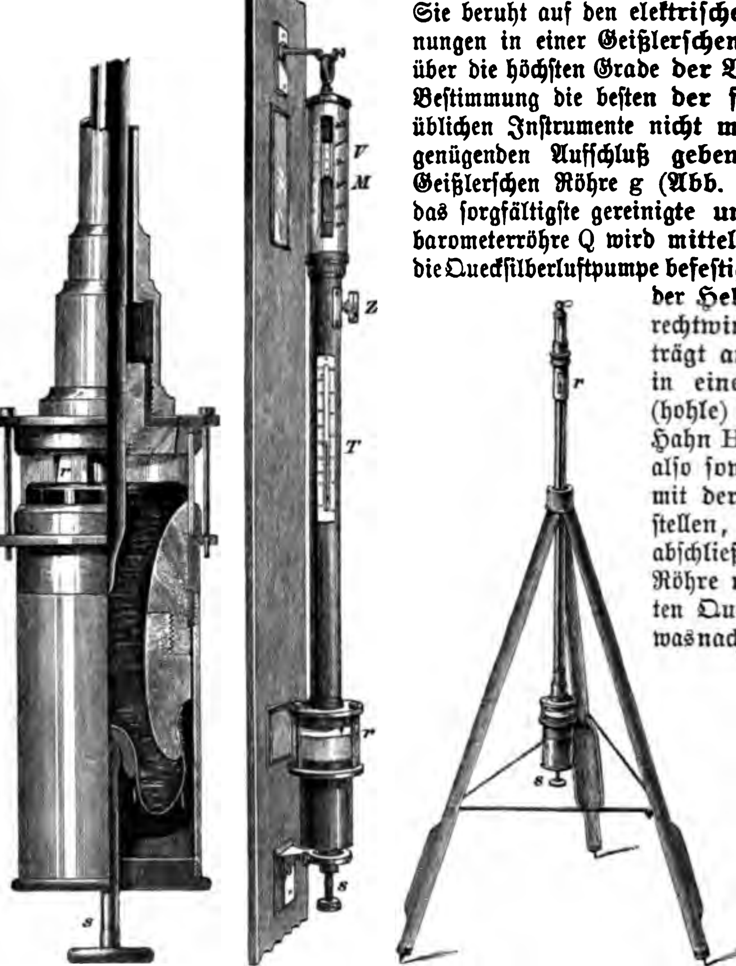
Bei den älteren Gay-Lussacschen Instrumenten war die Teilung meistens auf der Glasröhre selbst eingeätzt. Bei den von den bekannten Glaskünstlern Greiner und Geißler hergestellten Gay-Lussacschen Heberbarometern sind die Röhren sicher in Holzbekleidungen eingebettet, welche mit passenden Öffnungen und Blendvorrichtungen für die Einstellung und Ablesung versehen sind. Die Einstellung erfolgt in der Weise, daß eine Millimeterskale mittels Trieb und Zahnstange verstellt wird, bis ein an ihrem unteren Ende befindliches mit Fadenkreuz versehenes Ablesemikroskop auf den höchsten Punkt der Quecksilberkuppe im unteren freien Schenkel pointiert. Alsdann läßt sich auf der Skale mittels Trieb und Zahnstange ein kleiner Schlitten verschieben, welcher ein zweites Mikroskop zur Einstellung auf die obere Quecksilberkuppe und einen Nonius zur Ablesung der Skale trägt. Ein Thermometer gibt die Temperatur des Quecksilbers, ein zweites die Temperatur der Skale an.

In Abb. 581 ist ein Wild-Fueßsches Normalbarometer dargestellt, welches eine sehr sinnreiche Kombination eines Heberbarometers mit einem Gefäßbarometer bildet. Diese ermöglicht es, durch zwei unmittelbar nach einander an dem Instrumente auszuführende Beobachtungen zu konstatieren, ob im sogenannten Vakuum Luft vorhanden ist oder nicht. A ist der geschlossene Schenkel der Barometerröhre, welcher mit seinem unteren Ende tief in das Fortinsche Gefäß C hinein ragt; der sogenannte offene Schenkel B ist durch eine eigentümliche bei O sichtbare Glaskonstruktion an den Schenkel A angeschmolzen. Die Kommunikation von B mit der äußeren Luft findet durch eine kleine Öffnung beim Lüften der Schraube S statt. Dieses Glassystem ist fest in eine vernickelte Metallröhre eingebettet. Das Quecksilber kann mit der Schraube G der Fortinschen Vorrichtung gehoben oder gesenkt werden, bis die Quecksilberkuppe in dem freien Schenkel B mit dem Mittelstriche des kleinen Nonius N zusammenfällt, welcher den Nullpunkt der Skale bilden soll. Die Einstellung auf die untere wie auf die obere Quecksilberkuppe erfolgt mittels kleiner Mikroskope oder, wie in der Abbildung angegeben, durch Visiervorrichtungen, die Ablesung mit Hilfe von fein geteilten Nonien N; das Thermometer Th dient zur Ablesung der Temperatur.

Um zu prüfen, ob im Vakuum Luft enthalten ist, kann man nach Lösen der Schraube K den unteren Nonius und mittels der Schraube G entsprechend das untere Quecksilberniveau um eine beliebige (bis zu 80) Anzahl Millimeter höher stellen. Ergibt sich dann die gleiche Höhendifferenz zwischen der oberen und unteren Kuppe, wie vorher, so kann man,

vorausgesetzt, daß der Luftdruck inzwischen unverändert geblieben ist, schließen, daß im Vakuum keine Luft vorhanden ist. Bei Anwesenheit von Luft im Vakuum würde man eine kleinere Höhendifferenz beobachten müssen. Das Instrument findet mit Recht in der neueren Zeit wegen der Sicherheit und Genauigkeit seiner Angaben in den meteorologischen und in den besser eingerichteten physikalischen Instituten vielfach Verwendung.

Eine andere Methode zur Herstellung eines Normalbarometers, resp. zur Kontrolle des Vakuums durch elektrische Lichterscheinungen hat L. Grunmach angegeben und angewandt. Sie beruht auf den elektrischen Entladungserscheinungen in einer Geißlerschen Röhre, welche uns über die höchsten Grade der Verdünnung, zu deren Bestimmung die besten der für die Druckmessung üblichen Instrumente nicht mehr ausreichen, noch genügenden Aufschluß geben. Eine mit einer Geißlerschen Röhre g (Abb. 583) versehene, auf das sorgfältigste gereinigte und getrocknete Heberbarometerröhre Q wird mittels des Stopfens a an die Quecksilberluftpumpe befestigt. Der freie Schenkel der Heberbarometerröhre ist rechtwinkelig umgebogen und trägt an seinem Ende einen in eine sehr feine, lange (hohle) Spitze ausgezogenen Hahn H, mittels dessen man also sowohl Kommunikation mit der äußeren Luft herstellen, als auch die Röhre abschließen kann. Ist die Röhre mit reinem destillierten Quecksilber gefüllt, — was nach und nach mit kleinen Mengen Quecksilber unter beständigem Erwärmen und Evakuieren geschieht — und evakuiert man so weit, bis die Geißlersche Röhre, durch welche ein von einem großen Induktorium gelieferter elektrischer Strom geschickt wird, vollständig



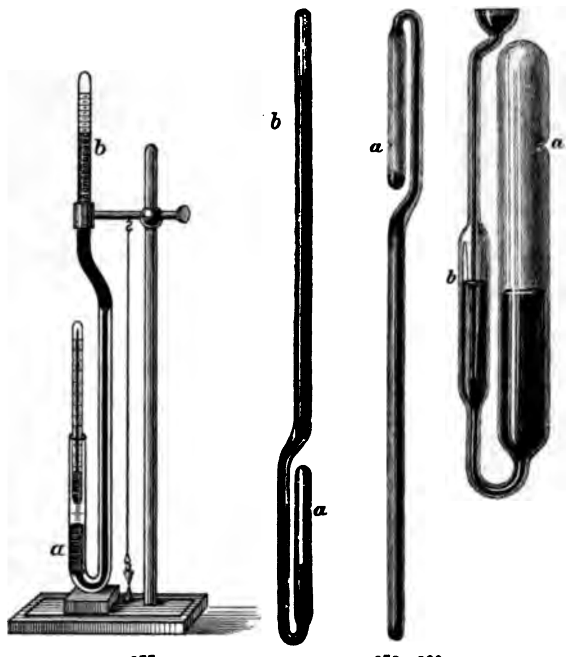
574. Fortinsche Gefäßvorrichtung. 575 u. 576. Fortinsches Barometer mit Aufhängevorrichtung. mit Stativ.

fluoresziert, oder bis gar keine, oder nur noch vereinzelte Entladungen durch die Röhre hindurchgehen, so kann dieser Zustand als Maß für ein Barometervakuum angesehen werden, da in diesem Falle bei weiter fortgesetztem Evakuieren trotz der Mannigfaltigkeit in den dabei eintretenden optischen Veränderungen der Erscheinungen kathetometrisch eine Abnahme des Druckes in keiner Weise mehr konstatiert werden kann. Die Methode ist vom Verfasser mit Erfolg an der Normal-Aichungs-Kommission angewandt worden, um das Vorhandensein von Luft in dem Vakuum eines anderen Heberbarometers nachzuweisen. Die Druckablesungen erfolgten in dem großen Komparatorsaale mit Hülfe des auf S. 215 u. 216 beschriebenen Bambergschen Kathetometers.

Ebenso wie bei der Herstellung des Barometers mit der größten Sorgfalt zu verfahren, insbesondere darauf zu achten ist, daß die Röhren und das Quecksilber rein, trocken und möglichst luftfrei sind, so sind auch bei der Anwendung desselben zur genauen Bestimmung des Luftdrucks mannigfache Vorsichtsmaßregeln zu berücksichtigen und Korrektionen in Rechnung zu ziehen.

Zunächst ist das Barometer genau vertikal aufzuhängen und vor der Einstellung das Quecksilber etwas zu erschüttern oder auf und ab zu bewegen, um eine möglichst schöne Kuppenbildung zu erhalten. Wenn auch Röhren und Quecksilber bei der Füllung möglichst rein gewesen sind, so wird das Glas doch mit der Zeit angegriffen und etwas trübe; an solchen Stellen haftet das Quecksilber, infolgedessen wird eine gute Kuppenbildung erschwert.

Da der Luftdruck durch die Länge einer Quecksilbersäule dargestellt, die Länge derselben aber durch die Temperatur beeinflußt ist, so wird bei der Ablesung auch stets die Temperatur zu berücksichtigen sein. Deshalb ist ein Barometer auch stets mit einem oder mit zwei Thermometern, welche zur Temperaturbestimmung dienen, versehen. Um aus dem bei der Temperatur t abgelesenen Barometerstande den Barometerstand bei der Normaltemperatur 0° C. zu finden, hat man von ersterem eine Größe abzuziehen, welche von der Ausdehnung des Quecksilbers und der Skale abhängt, mit steigender Temperatur und steigendem Barometerstande zunimmt und für mittlere meteorologische Verhältnisse zwischen 1,5 und 3 mm schwankt. Man nennt den bezüglich der Temperatur von Quecksilber und Skala korrigierten Barometerstand den **reduzierten Barometerstand**.



577. Heberbarometer. 578—580. Gay-Lussacs Heberbarometer.

Eine andere bei Barometerablesungen zu berücksichtigende Korrektion ist die infolge der **Kapillardepression** des Quecksilbers. Quecksilber bildet in einer Röhre, weil die Kohäsion seiner Teilchen gegen einander größer ist, als deren Adhäsion gegen die Glaswand, eine konvexe Kuppe; diese übt gleich einer gespannten Membran einen vertikal nach unten gerichteten Druck aus, welcher zu dem von der Quecksilbersäule infolge ihres Gewichtes ausgeübten hinzukommt. Zu dem in mm abgelesenen Barometerstande ist daher der in mm ausgedrückte **Kapillardruck** zu addieren.

Beim Wasser findet umgekehrt Kapillarattraktion statt; die Adhäsion der Wasserteilchen gegen die Glaswand ist größer, als ihre eigene Kohäsion; Wasser bildet in einer Röhre eine konkave Kuppe.

Die Kapillardepression ist um so größer, je enger die Röhre ist, außerdem ist sie abhängig von der Höhe der Kuppe (**Meniskus**); sie beträgt z. B.

0,2 mm bei einer Röhrenweite von 10 mm und einer Kuppenhöhe von 1 mm und
1,98 mm „ „ „ „ 4 mm „ „ „ „ 1 mm

Die Kuppenbildung hängt auch von Schwankungen des Luftdrucks ab; bei steigendem Luftdruck wird die Kuppe steiler, bei sinkendem flacht sie sich ab. Beim Heberbarometer sind, um die Kapillardepression zu eliminieren, beide Schenkel von genau gleicher Weite

und für Normalbarometer die Röhren so weit zu wählen, daß die Kapillardepression zu vernachlässigen ist.

Da das sogenannte Vakuum in Wirklichkeit nicht leer ist, sondern Quecksilberdampf enthält, so ist bei genauen Barometervergleichungen eine geringe, von der Spannkraft des Quecksilberdampfes herrührende Korrektion zu berücksichtigen, wenn die zu vergleichenden Instrumente sich in Räumen von verschiedener Temperatur befinden.

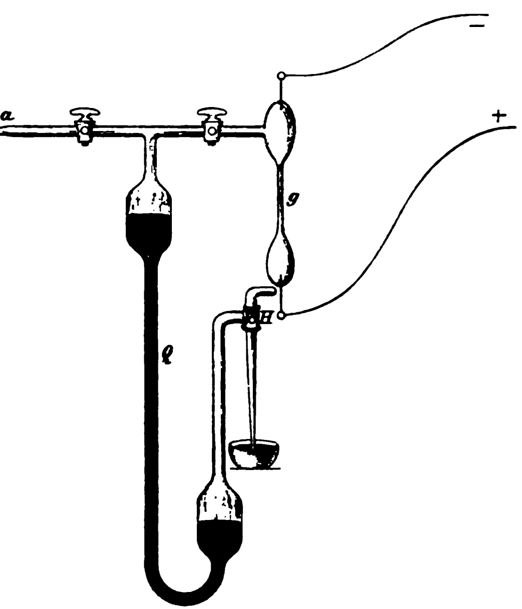
Die Atmosphäre. Fassen wir die um die Erde gelagerte Luftmasse als ein Ganzes auf, so liegt es nahe, nach der Höhe, bis zu welcher die Atmosphäre sich über uns erstreckt, zu fragen. Besäße die Luft in allen Schichten gleiche Dichtigkeit, so würde man aus dem leicht zu ermittelnden Gewichte der Luft die Entfernung der obersten Luftschicht berechnen können. Da aber die Dichtigkeit der Luft, welche eine unbegrenzte Expansionsfähigkeit zu besitzen scheint, abnimmt, wenn man sich in ihr erhebt, so läßt sich auf diesem Wege die Grenze der Erdatmosphäre nicht berechnen. Nach Wollaston kann sie unter der Voraussetzung, daß der Mond eine Atmosphäre besitzt, nicht über jene Region hinausreichen, in welcher die Attraktion des Mondes derjenigen der Erde das Gleichgewicht hält, während sie nach G. G. Schmidt dort anzunehmen ist, wo die Expansivkraft der Luft der anziehenden Wirkung der Schwere das Gleichgewicht hält. Genau können wir sie noch nicht angeben; wir können nur auf Grund von Voraussetzungen über die Abnahme der Temperatur oder des Druckes mit der Höhe und auf Grund gewisser astronomischer Erscheinungen die Höhe der Erdatmosphäre angenähert auf 10—14 Meilen schätzen.

Eine Quecksilbersäule von 76 cm Höhe und 1 qcm Querschnitt hat ein Gewicht von nahezu 1,033 kg; ebensoviel wiegt eine 10 m hohe Wassersäule von gleichem Querschnitt, und da die Luft, welche auf diesen Querschnitt drückt, einem solchen Gewichte das Gleichgewicht hält, so muß demnach eine Luftsäule, welche von der Erdoberfläche bis an die äußerste Grenze der Atmosphäre reicht und 1 qcm Querschnitt hat, auch 1,033 kg wiegen. Der Druck der Luft auf den qcm beträgt also 1,033 kg, auf den qdcm also 103,3 kg, auf den qm 10330 kg. Auf einer □Meile lasten demnach 13500 Mill. Ztr., und das Gewicht des ganzen uns umgebenden Luftozeans berechnet sich zu nicht weniger, als 106495865000 Mill. Ztr. Da es von wesentlichem Einfluß ist, in welcher Höhe der Druck der Atmosphäre gemessen wird, so hat man als Ausgangspunkt für Vergleichungen denjenigen Druck angenommen, welcher im Niveau der Meeresoberfläche herrscht. Auf ihn pflegt man gewöhnlich die Beobachtungen zu reduzieren.

581 u. 582. Wild-Fueß'sches Normalbarometer.

Barometrische Höhenmessungen. Bereits im Jahre 1643 soll die Torricellische Röhre in Toscana zum Messen von Berghöhen angewandt worden sein; indessen datiert für uns die rationelle Behandlung dieser Aufgabe erst einige Jahre später. Gegen Ende des Jahres 1647 veranlaßte Pascal, um seine eigenen Untersuchungen zu prüfen und zu erweitern, seinen Verwandten Périer, Beobachtungen des Luftdrucks mittels der Torricellischen Röhre auf dem nahe der Stadt Clermont in der Auvergne gelegenen Puy de Dôme, einem über 1400 m hohen Berge, anzustellen. Die Ausführung der Ver-

suche verzögerte sich aber bis zum September des Jahres 1648. An einem schönen Tage wurde im Garten des Franziskanerklosters der Luftdruck durch die Höhe der Quecksilbersäule mittels zweier Torricellischen Barometer gemessen. Périer fand sie übereinstimmend zu 26 Zoll 3½ Linien (Pariser Maß). Eine von diesen Röhren blieb nun in dem Garten zurück und wurde fortwährend beobachtet, um jedes etwa eintretende Sinken oder Steigen der Quecksilbersäule der Zeit nach bestimmen zu können. Die andere wurde von Périer mit auf den Gipfel des Puy de Dôme genommen. Hier wurde das Experiment wiederholt, und siehe da, der obere Spiegel des Quecksilbers lag nicht mehr 26 Zoll 3½ Linien, sondern nur 23 Zoll 2 Linien über dem unteren Spiegel. „Dieses Experiment", erzählt Périer, „setzte uns alle in Verwunderung und Erstaunen; wir wurden förmlich verblüfft von einem solchen Ausgang, den sofort zu wiederholen wir unsrer eigenen Genugthuung wegen unternahmen; noch fünfmal repetierten wir das Experiment unter den abweichendsten Verhältnissen auf dem Gipfel des Berges, bald den Apparat bedeckt, bald frei, bei verschiedenem Wetter, frei vor dem Wind und dann wieder geschützt — immer mit demselben Resultat." Beim Herabsteigen vom Berge wurde zwischen dem Gipfel und dem Klostergarten noch eine Station gemacht; hier fand sich die Höhe der Quecksilbersäule in der Röhre zu 25 Zoll. Als die Expedition wieder an den Ausgangspunkt zurückkam und das dort zurückgelassene Instrument beobachtete, fand sie, daß es genau den alten Stand von 26 Zoll 3½ Linien Quecksilberhöhe behalten hatte, und daß ebenso die zweite, vom Puy de Dôme wieder mit herabgebrachte Röhre jetzt denselben Stand zeigte. Die veränderte Höhe der Säule mußte also eine Folge der Erhebung über den ersten Beobachtungsort und, wie es die Physiker bereits richtig erkannt hatten, eine Folge des verminderten Luftdrucks in jenen größeren Höhen sein. Indessen schien der eine Versuch noch nicht beweiskräftig genug.

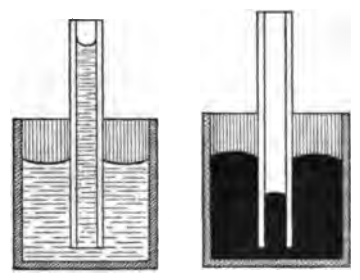


583. Herstellung eines Normalheberbarometers.

Am folgenden Tage machte Périer neue Versuche, den ersten in einem im höchsten Stadtteil gelegenen Privathause, nahe der Notre-Dame-Kirche, den zweiten auf dem Turme jener Kirche. Selbst bei diesen verhältnismäßig geringen Erhebungen war die Abnahme des Luftdrucks aus der geringeren Höhe der Quecksilbersäule zu erkennen, und alle Beobachtungen bestätigten die von Torricelli und Pascal gezogenen Schlüsse auf das vollständigste. Man hatte gefunden, daß bei einer Erhebung von 7 Toisen die Quecksilbersäule um circa ½ Linie, bei 27 Toisen Höhe um 2½ Linie, bei 150 Toisen um 15½ Linien und bei 500 Toisen um 37½ Linien gefallen war (1 m = 0,513 Toisen oder = 443,3 Pariser Linien).

Wir haben mit einiger Ausführlichkeit diese Versuche behandelt, weil sie historisch berühmt sind und ein schönes Beispiel geben von dem klaren Blick ihrer Urheber, welche durch ein rationell angestelltes Experiment eine nur geahnte Wahrheit bewiesen.

Die Schlüsse, welche Périer an seine wohlgeglückte Unternehmung knüpfte, sind nicht minder interessant als diese selbst. Es entging ihm nicht, daß die Abnahme der


584 u. 585. Kapillar-Attraktion des Wassers und -Depression des Quecksilbers.

Quecksilberhöhe mit einer Regelmäßigkeit erfolgte, die sie der **mathematischen Berechnung** zugänglich machte. **„Ich zweifle nicht"**, schreibt er in seinem **Berichte an Pascal**, **„daß ich** so glücklich sein werde, Ihnen eines Tages eine Tabelle **überreichen zu können**, welche mit Genauigkeit die Höhendifferenzen der Quecksilbersäule für je 100 Toisen Erhebung angibt." — So **richtig** nun aber auch die Voraussetzung **war**, so **blieb doch** die Torricellische Röhre für den angeführten Zweck **noch** lange ein **unvollkommenes** Instrument, und als **Bouguer** 1743 aus Peru zurückkehrte und aus den in den Anden gemachten Barometerbeobachtungen die Höhenpunkte berechnete, kam er zu der **Überzeugung**, daß seine Formel eben nur für die sehr bedeutenden Höhen jener Gebirge **anwendbar** sei. Man hatte nämlich bisher die Wirkung der Wärme auf die **Ausdehnung der Luftschichten** nicht genügend in Berechnung zu ziehen vermocht, ebenso wenig den **Einfluß**, den die Zentrifugalkraft unter verschiedenen Breiten auf das Gewicht der **Luftsäule ausübt**, und konnte deshalb besonders für niedrigere Erhebungen, bei denen bedeutende **Temperaturschwankungen** stattfinden, genaue Resultate nicht erlangen. Bouguer **lehrte** den **Einfluß der Temperatur** berechnen. Später stellte **Ramond** in den Pyrenäen **ausführliche Beobachtungen** an, auf welche **Laplace** die **Berechnung** seiner Formeln zur **barometrischen Höhenmessung** gründete, welche **heute noch in Anwendung** sind. Damit war **der physikalischen Geographie** ein neues **und wichtiges Werkzeug** in die Hand gegeben. **Hatte man früher** die Erhebung der **Erdoberfläche über den** Meeresspiegel **nicht anders zu bestimmen** vermocht als **durch** sehr **komplizierte und** nur schwierig **ausführbare trigonometrische** Aufnahmen, so vermochte **jetzt jeder Reisende**, jeder Bergbesteiger mit **Leichtigkeit durch** Anstellung weniger und **verhältnismäßig rasch** auszuführender Versuche die **erreichte Höhe** zu messen, was **nicht** nur für **die Entwickelung** der **physikalischen Geographie, sondern** auch der Geologie, der **Pflanzengeographie**, kurz für alle **Disziplinen der Erdkunde von** großem Einfluß wurde. **Wenn man** die Arbeiten **Humboldts in** dieser **Beziehung** überblickt, so wird man staunen über die enorme Bereicherung, welche die Erdkunde durch diese **Methode** der **Messung** erfuhr. Man durchschaue jetzt die hypsometrischen Tafeln der Erde, welche die **Höhe** der **einzelnen** Punkte über dem Meeresspiegel angeben, und man wird eine Vollständigkeit **der Angaben** finden, die es dem mechanischen Künstler möglich **macht**, von **Gebirgszügen** der Erdhalbkugel, die er nie mit eigenen Augen gesehen hat, die **genauesten plastischen** Darstellungen anzufertigen. Die Kartographie hat ganz neue **Bahnen zur Herstellung** von Karten und Reliefs eingeschlagen, aus denen sich leicht die genaue **Höhe jedes Punktes** ersehen läßt. Und die bei weitem größte Zahl dieser Höhenangaben **ist mit Hilfe des** Barometers gemacht worden.



586. Holosteric-Barometer.

In neuerer Zeit werden vielfach zu Höhenmessungen Aneroid- oder Holosteric-Barometer angewandt, welche aus einer luftleer **gemachten Kapsel bestehen**, die **durch** eine dünne, gewellte, elastische Metallplatte verschlossen ist. Die Kapsel **wird durch größere** oder geringere Änderungen des Luftdrucks mehr oder weniger **deformiert**, **und ihre kleinen** Bewegungen werden durch Hebelübersetzung auf einen Zeiger **übertragen**, **der sie in** vergrößertem Maße auf einer empirisch graduierten Skale markiert. **In Abb.** 586 **ist ein** Holosteric-Barometer dargestellt, welches mit Metallskale und **Thermometer und einer** Kompensationsvorrichtung zur Aufhebung der Temperatureinflüsse **versehen ist und direkt** den auf 0° C. reduzierten Barometerstand angibt. **Dem Instrumente wird eine Tabelle**

mitgegeben, aus welcher man direkt die den Barometerangaben entsprechenden Höhen entnehmen kann. Ein solches Instrument ist zwar für Reisebeobachtungen sehr bequem, aber Veränderungen unterworfen und deshalb in seinen Angaben nicht so zuverlässig wie ein Quecksilberbarometer, mit welchem es jedenfalls in gewissen Zeitintervallen behufs Kontrolle seiner Angaben verglichen werden muß.

Zur Berechnung der in Meter ausgedrückten Höhendifferenz H zweier Stationen, deren Barometerstand gleichzeitig beobachtet worden ist, dient die Formel

$$H = 18450 (\log b_0 - \log b_1)(1 + 0{,}004\, t) \text{ m},$$

in welcher b_0 den Barometerstand an der tiefer gelegenen, b_1 denjenigen der höher gelegenen Station und t die mittlere Temperatur zwischen beiden Stationen bedeuten. Bis zu Höhendifferenzen von 1000 m läßt sich hierfür die bequemere Formel anwenden

$$H = 16000 \frac{b_0 - b_1}{b_0 + b_1}(1 + 0{,}004\, t) \text{ m}.$$

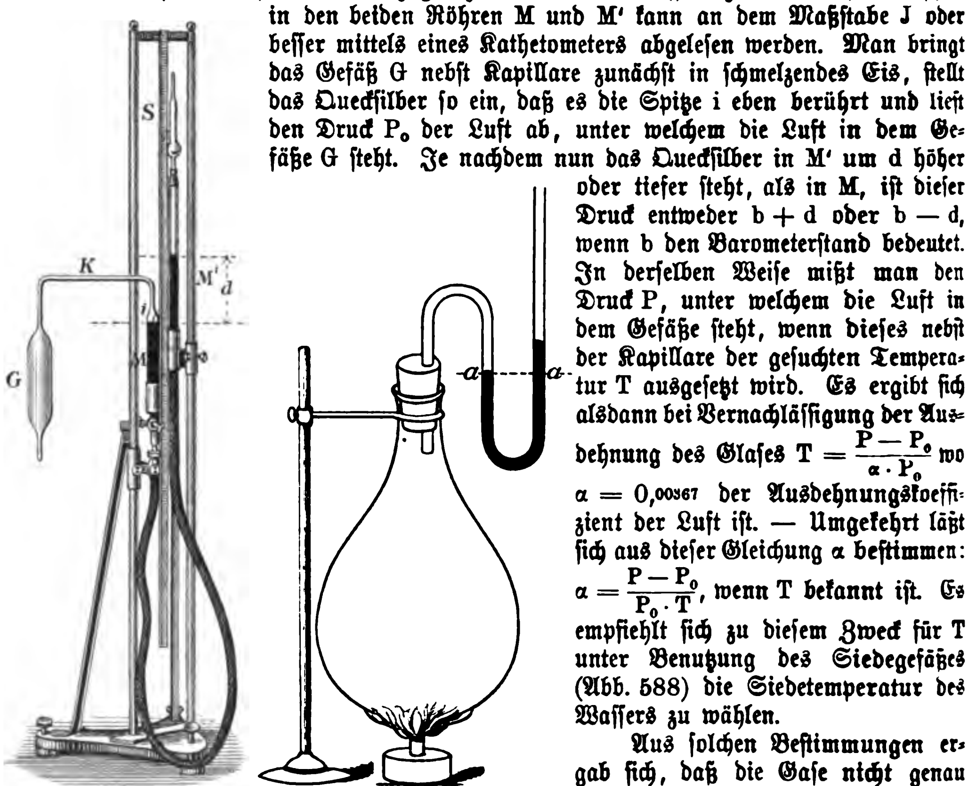
Aus derselben ergibt sich, daß für kleinere Höhen einer barometrischen Differenz von 1 mm eine Höhendifferenz von 10,5 m entspricht.

Hypsothermometer. Da die Siedetemperatur des Wassers abhängig ist vom Luftdruck, so kann auch ein Thermometer unter Benutzung der Regnaultschen Spannkraftstabellen, welche den Zusammenhang zwischen Siedetemperatur und Luftdruck ergeben, indirekt zur barometrischen Höhenmessung angewandt werden. Das Thermometer braucht für diesen Zweck nur von etwa 95—100° geteilt zu sein, muß aber für dieses Intervall eine außerordentlich feine (in der Regel von 0,005 zu 0,005° C. fortschreitende) Teilung besitzen, wenn man einigermaßen sichere Messungen erzielen will, da der Differenz von 0,1° C. der Siedetemperatur eine barometrische Differenz von etwa 2,7 mm, also eine Höhendifferenz von etwa 28,35 m entspricht. Thermometer für diesen Zweck heißen Hypsothermometer.

Doch kehren wir nach dieser Abschweifung zu der Betrachtung der Ausdehnung gasförmiger Körper zurück! Wir haben gesehen, daß ein Gas, wenn man den Druck konstant erhält, bei einer Temperaturerhöhung von 1° C. um $\frac{1}{273}$ seines ursprünglichen Volumens ausgedehnt wird. Durch eine Erwärmung auf 273° C. würde also das ursprüngliche Volumen verdoppelt werden. Wir wollen jetzt unsern Versuch (S. 437) abändern, und statt die Luft sich ausdehnen zu lassen, ihre Ausdehnung verhindern, also ihr Volumen konstant erhalten, während wir sie erwärmen; dann müssen wir ihren Druck vergrößern. Denken wir uns wieder den mit Luft gefüllten und mit einem Quecksilbermanometer versehenen Glaskolben (Abb. 588) auf der konstanten Temperatur von 0° C. und unter dem Drucke einer Atmosphäre befindlich, so daß also das Quecksilber in beiden Schenkeln des Manometers gleich hoch steht, und erwärmen wir nun die Luft von 0° auf 1° C., so müssen wir, wenn wir ihr ursprüngliches, durch das Quecksilberniveau a begrenztes Volumen konstant erhalten wollen, durch Hinzugießen von Quecksilber im offenen Schenkel den Druck um $\frac{1}{273}$ erhöhen; durch die bei konstantem Volumen erfolgte Erwärmung um 1° C. wird die elastische Kraft der Luft um $\frac{1}{273}$ ihres ursprünglichen Wertes gesteigert; erwärmen wir die Luft um 2° C., so müssen wir den ursprünglichen Druck um $\frac{2}{273}$ erhöhen, um das Volumen konstant zu erhalten, bei einer Temperaturerhöhung von 273° müssen wir den ursprünglichen Druck verdoppeln, um das Volumen konstant zu erhalten.

Der soeben beschriebene Versuch kann als Grundlage und Erläuterung der Einrichtung desjenigen Meßinstrumentes dienen, welches das wissenschaftlich rationellste Maß für die Temperatur liefert, und dessen Angaben die Basis der gesamten Thermometrie bilden, nämlich des zuerst von Rudberg angegebenen Luftdruckthermometers, bei welchem die Temperatur aus der Spannungsänderung eines auf konstantem Volumen erhaltenen Luftquantums bestimmt wird. Es besteht im wesentlichen aus einem Luftgefäß, das durch eine Kapillarröhre mit einem vertikalen Meßrohre in Verbindung steht, in welchem die Luft bis zu einer bestimmten Marke durch Quecksilber abgeschlossen wird. Abb. 587 stellt ein Luftthermometer in der ihm von Jolly gegebenen Form dar: An ein cylindrisches mit trockener Luft gefülltes Glasgefäß G ist eine zweimal rechtwinkelig gebogene Kapillarröhre K

und an diese eine weitere Glasröhre M angeschmolzen, welche unten in einen Stahlhahn eingekittet ist. Das diesen Hahn tragende Metallstück wird mittels einer Überwurfsschraube an ein zweites Metallstück befestigt, welches durch einen starken Kautschukschlauch mit der Meßröhre M' verbunden ist. Die beiden Röhren M und M' können mittels Schlitten und (in der Abbildung nicht gezeichneter) Mikrometerschraube in Führungen auf und nieder bewegt werden. Sie sind samt dem Schlauch mit Quecksilber gefüllt. An der Stelle i, bei welcher die Kapillare in die weitere Röhre M übergeht, ist eine sehr feine schwarze Glasspitze eingeschmolzen, bis zu welcher das Quecksilber immer eingestellt wird, um das konstante Luftvolumen abzugrenzen. Die Niveaudifferenz der Quecksilberkuppen in den beiden Röhren M und M' kann an dem Maßstabe J oder besser mittels eines Kathetometers abgelesen werden. Man bringt das Gefäß G nebst Kapillare zunächst in schmelzendes Eis, stellt das Quecksilber so ein, daß es die Spitze i eben berührt und liest den Druck P_0 der Luft ab, unter welchem die Luft in dem Gefäße G steht. Je nachdem nun das Quecksilber in M' um d höher oder tiefer steht, als in M, ist dieser Druck entweder $b + d$ oder $b - d$, wenn b den Barometerstand bedeutet. In derselben Weise mißt man den Druck P, unter welchem die Luft in dem Gefäße steht, wenn dieses nebst der Kapillare der gesuchten Temperatur T ausgesetzt wird. Es ergibt sich alsdann bei Vernachlässigung der Ausdehnung des Glases $T = \frac{P - P_0}{\alpha \cdot P_0}$ wo $\alpha = 0{,}00367$ der Ausdehnungskoeffizient der Luft ist. — Umgekehrt läßt sich aus dieser Gleichung α bestimmen: $\alpha = \frac{P - P_0}{P_0 \cdot T}$, wenn T bekannt ist. Es empfiehlt sich zu diesem Zweck für T unter Benutzung des Siedegefäßes (Abb. 588) die Siedetemperatur des Wassers zu wählen.



587. Luftthermometer von Jolly. 588.

Aus solchen Bestimmungen ergab sich, daß die Gase nicht genau denselben Ausdehnungskoeffizienten haben, daß z. B.

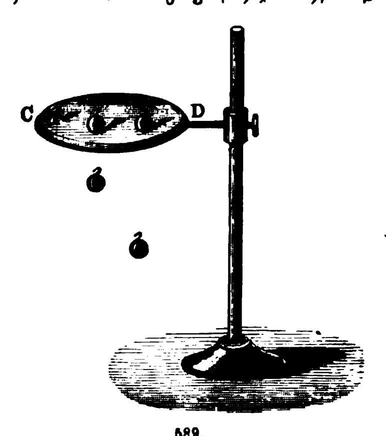
der Ausdehnungskoeffizient des Wasserstoffs 0,00366
" " der Luft 0,00367
" " " Kohlensäure 0,00370

beträgt, und daß er sich bei den Gasen um so größer ergibt, je leichter sich dieselben verflüssigen lassen. Die Definition der Temperatur durch das Luftthermometer ist deshalb von so großer wissenschaftlicher und praktischer Bedeutung, weil bei seiner thermometrischen Substanz, der Luft, die Zunahme ihres Volumens bei konstantem Drucke ebenso wie die Zunahme ihrer Spannkraft bei konstantem Volumen dem Temperaturzuwachs wirklich proportional ist, da die Luft bei den höchsten wie bei den tiefsten Temperaturen im gasförmigen Zustande erhalten werden kann (vgl. indessen S. 473).

Absoluter Nullpunkt der Temperatur. Wir haben eben gesehen, daß, wenn die Temperatur der Luft um 1° C. erhöht wird, während ihr Volumen konstant erhalten wird, ihre Spannkraft um $\frac{1}{273}$ des Wertes vermehrt wird, welchen sie bei 0° C. besitzt, und daß diese Kraft verdoppelt wird, wenn wir die Temperatur um 273° C. erhöhen. Umgekehrt würde, wenn wir von der Temperatur 0° C. ausgehend, dieselbe um 1° C. er-

niedrigen, die Spannkraft der Luft um $\frac{1}{273}$ ihres Wertes verringert werden, und wenn wir mit der Abkühlung bis 273° unter 0° C. fortfahren, die Luft vollständig vom Drucke befreit sein, sie würde den absoluten Nullpunkt der Temperatur erreicht haben. Obgleich derselbe niemals erreicht worden ist, hat man ihn doch als Ausgangspunkt für jede wissenschaftliche Temperaturmessung gewählt. Man gelangt dann zu dem einfachen fundamentalen Gesetz, daß der Druck eines Gases bei konstantem Volumen proportional ist seiner absoluten Temperatur. Verglichen mit dem Eispunkt des Celsiusschen Quecksilberthermometers liegt der absolute Nullpunkt also bei — 273° C., und umgekehrt liegt der Eispunkt des Celsiusschen Thermometers bezogen auf die absolute Temperaturskale bei 273°, so daß also z. B. der Temperatur 20° C. die absolute Temperatur $273 + 20 = 293°$ entspricht.

Kalorimetrie. Nachdem wir die Thermometrie behandelt haben, wollen wir uns zur Kalorimetrie wenden, d. h. zu den Methoden, Wärmemengen zu messen. Bringt man zwei Körper von verschiedener Temperatur mit einander in Berührung, so findet ein Temperaturausgleich zwischen ihnen statt, indem Wärme von dem wärmeren Körper zum kälteren übergeht; die gemeinschaftliche Endtemperatur liegt im allgemeinen zwischen den Temperaturen, welche die Körper vor der Berührung hatten. Dabei zeigt sich jedoch, daß je nach der Natur der Substanz bei gleicher Masse der eine Körper eine größere Wärmemenge als der andere zum Ausgleiche verlangt. Eine bestimmte Wärmemenge ist z. B. im stande, die Temperatur von 1 kg Quecksilber um 10° C. zu erhöhen; wollte man 1 kg Wasser um 10° C. erhöhen, so müßte man ihm, wie das Experiment zeigt, eine 30mal so große Wärmemenge zuführen. Unter den verschiedenen kalorimetrischen Messungsmethoden ist diejenige, bei welcher eine Wärmemenge gemessen wird nach der Menge des Wassers, deren Temperatur sie um eine bestimmte Größe zu erhöhen im stande ist, am gebräuchlichsten. Demgemäß wird als Einheit der Wärmemenge diejenige Wärmemenge definiert, welche erforderlich ist, um die Temperatur von 1 g destillierten Wassers von + 4° C. um 1° C. zu erhöhen. Diese Einheit heißt Kalorie oder genauer Gramm-Kalorie (zum Unterschied von der in der Technik gebräuchlichen, 1000 Mal größeren Einheit für die Wärmemenge der Kilogramm-Kalorie). Unter Wärmekapazität eines Körpers versteht man die Anzahl von Wärmeeinheiten, welche erforderlich sind, um seine Temperatur um 1° C. zu erhöhen, und unter spezifischer Wärme eines Körpers das Verhältnis seiner Wärmekapazität zur Wärmekapazität einer gleich großen Masse destillierten Wassers von + 4° C. Demnach wird die spezifische Wärme als eine reine Zahl ausgedrückt; die spezifische Wärme 1 besitzt destilliertes Wasser von + 4° C.



589. Tyndalls Versuch über spezifische Wärme.

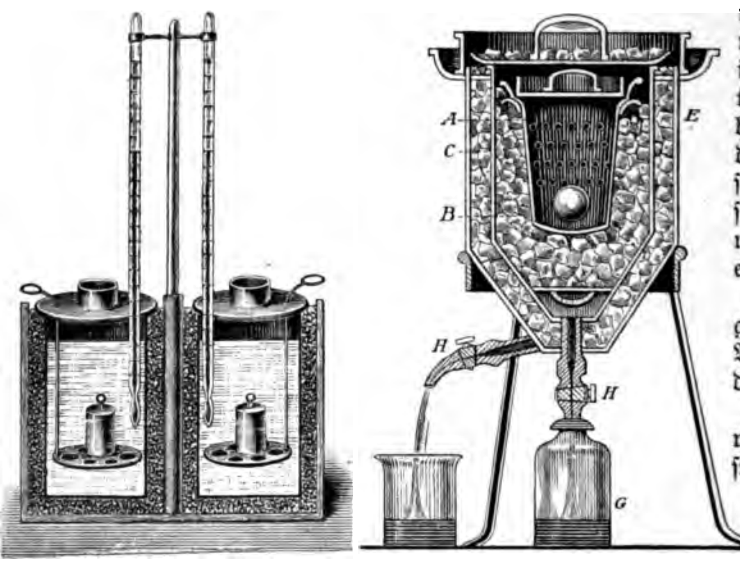
Ein beliebter Versuch, die Verschiedenheit der spezifischen Wärme verschiedener Substanzen nachzuweisen, ist der von Tyndall angegebene: fünf gleich schwere Kugeln aus Eisen, Kupfer, Zinn, Blei und Wismut werden in einem Ölbade gleichzeitig bis auf etwa 180° C. erhitzt und hierauf schnell auf eine Wachsscheibe CD gelegt (Abb. 589); sie schmelzen das darunter liegende Wachs und sinken ein, aber mit verschiedener Geschwindigkeit; die Eisen- und Kupferkugeln sinken schneller und tiefer ein, als die anderen und fallen bald unten durch, während die Zinnkugel zwar tief eindringt, aber nicht hindurchzudringen vermag, und die Blei- und Wismutkugeln nur geringe Vertiefungen hervorbringen.

Der Versuch lehrt, daß Eisen die größte spezifische Wärme besitzt, dann folgt Kupfer, dann Zinn u. s. f.

Zur quantitativen Bestimmung der spezifischen Wärme fester oder flüssiger Körper wendet man vorzugsweise zwei Methoden an, die Mischungs- und die Eisschmelzungsmethode, bisweilen wohl auch die Strahlungsmethode.

Mischungsmethode. Das Prinzip derselben besteht darin, daß eine genau abgewogene Menge (etwa m Gramm) der zu untersuchenden Substanz auf eine genau zu messende Temperatur t erwärmt und hernach schnell in ein Gefäß (das **Kalorimeter**) gebracht wird, welches mit einer ebenfalls vorher genau abgewogenen Wassermenge (etwa m_1 Gramm) von bestimmter Temperatur t_1 gefüllt ist. Aus der Temperaturerhöhung, welche das Wasser erfährt, läßt sich dann die spezifische Wärme x der Substanz berechnen. Ist nämlich die gemeinsame Endtemperatur von Wasser und Substanz gleich T, so besteht für die von der Substanz an das Wasser abgegebene Wärmemenge offenbar die Gleichung $m x (t - T) = m_1 (T - t_1)$, aus der sich $x = \frac{m_1}{m} \cdot \frac{T - t_1}{t - T}$ ergibt.

Das Wasserkalorimeter besteht in der Regel aus dünnem Silberblech, ist mit einer wärmeisolierenden Umhüllung zum Schutze gegen Wärmeausstrahlung versehen und enthält eine Rührvorrichtung, um den Temperaturausgleich zu beschleunigen, sowie ein empfindliches, feingeteiltes Thermometer. Die Wärmekapazität des Kalorimeters selbst ist bei der Bestimmung in Rechnung zu bringen. Man nennt den **Wasserwert** des Kalorimeters diejenige Wärmemenge, welche nötig ist, um seine Temperatur um 1° C. zu erhöhen. Er ist gleich dem Produkte aus seinem Gewichte und seiner spezifischen Wärme. In Abb. 590 ist ein Doppelkalorimeter zur schnellen Vergleichung der spezifischen Wärmen zweier Körper dargestellt.

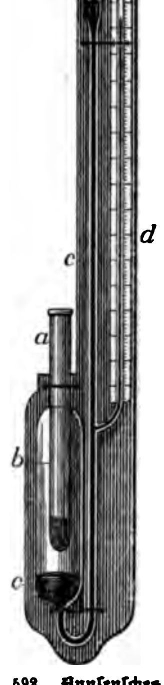


590. Doppelkalorimeter. 591. Eiskalorimeter.

Eisschmelzungsmethode. Abb. 591 stellt das **Eiskalorimeter** von **Lavoisier** und **Laplace** dar. Die genau abgewogene und auf eine bestimmte Temperatur erwärmte Substanz, z. B. eine Eisenkugel, wird schnell in das Körbchen A gebracht, welches in einem doppelwandigen Gefäß von allen Seiten von klein zerstoßenem Eise von 0° C. umgeben ist. Die Kugel kühlt sich bald auf 0° ab, und die von ihr an das Eis in B abgegebene Wärmemenge wird dazu verwandt, einen Teil desselben zu schmelzen, d. h. in Wasser von 0° zu verwandeln, welches mittels des Hahnes H in dem Gefäß G aufgefangen wird. Um zu verhüten, daß dem Eis in B Wärme von außen her zugeführt werde, ist dasselbe mit einem Schmelzmantel C von Eis umgeben, aus welchem das Schmelzwasser durch den Hahn H_1 abfließen kann. Aus der durch das abfließende Wasser gemessenen Menge q des geschmolzenen Eises läßt sich dann unter Berücksichtigung der Thatsache, daß die latente Schmelzwärme des Eises 80 beträgt (vgl. S. 457), — d. h. daß 80 Grammkalorieen erforderlich sind, um 1 g Eis von 0° C. in Wasser von 0° C. zu verwandeln — die spezifische Wärme x der Kugel bestimmen. Denn angenommen, die Kugel hat die Masse von m Gramm und war auf die Temperatur t gebracht worden, so besaß sie die Wärmemenge m t x Grammkalorieen; die von dem Eise aufgenommene Wärmemenge ist aber $q \cdot 80$ Grammkalorieen: folglich besteht die Gleichung $m t x = 80 \cdot q$, aus welcher sich $x = \frac{80 \cdot q}{m t}$ berechnen läßt.

Die Methode ist insofern mit einer Fehlerquelle behaftet, als notwendigerweise etwas Schmelzwasser am Eise hängen bleibt; damit die Menge klein genug bleibt, um im Vergleich mit der gemessenen Menge Schmelzwassers vernachlässigt werden zu können, müssen große Mengen der Substanz angewendet werden, um brauchbare Resultate zu erhalten.

Von dieser Fehlerquelle ist die Eisschmelzungsmethode mittels des Bunsenschen Eiskalorimeters frei, bei welchem in ähnlicher Weise verfahren, aber zur Bestimmung der spezifischen Wärme nicht die Menge geschmolzenen Eises benutzt wird, sondern die Volumenverminderung, welche Eis von 0° C. beim Übergange in Wasser von 0° C. erfährt. Der Apparat ist in Abb. 592 dargestellt. Das Reagenzgläschen a ist in das weitere Glasgefäß b eingeschmolzen, welches sich in die U förmige Röhre c c fortsetzt. In dem oberen Teile von b befindet sich ausgekochtes destilliertes Wasser, in dem unteren Teile und der U förmigen Röhre c ausgekochtes Quecksilber. Vor dem Versuche wird das Wasser in b zu Eis gebildet und dann auf der konstanten Temperatur 0° C. erhalten, indem der ganze Apparat in schmelzenden Schnee oder in klein gestoßenes schmelzendes Eis eingebettet wird. Die genau abgewogene und auf eine bestimmte Temperatur erhitzte Substanz wird in das Reagenzgläschen geworfen, bringt einen Teil des Eises zum Schmelzen, und die dadurch eintretende Volumenverminderung wird durch den im kalibrierten Kapillarrohr d zurückgehenden Quecksilberfaden beobachtet.



592. Bunsensches Eiskalorimeter.

Bei der Strahlungsmethode wird das Verhältnis der spezifischen Wärmen zweier Substanzen bestimmt durch das Verhältnis der Zeiten, welche sie bei gleicher Oberflächenbeschaffenheit gebrauchen, um sich von einer bestimmten Temperatur auf dieselbe Umgebungstemperatur durch Ausstrahlung abzukühlen.

Nach diesen Methoden sind die spezifischen Wärmen fester und flüssiger Körper bestimmt worden, und zwar beträgt z. B. die mittlere spezifische Wärme von Wismut 0,030, diejenige von Blei 0,031, von Platin 0,032, von Silber 0,056, von Messing 0,086, von Kupfer 0,093, von Eisen 0,113, von Quecksilber 0,003. Wasser besitzt von allen festen und flüssigen Körpern die größte spezifische Wärme, nämlich 1. Hieraus erklärt sich der mildernde Einfluß, welchen das Meer und weite Wasserflächen infolge ihrer langsamen Erwärmung im Sommer und ihrer langsamen Abkühlung im Winter auf die klimatischen Verhältnisse eines Landes ausüben.

William Thomson (Lord Kelvin) hat gezeigt, wie man unter der Annahme, daß die spezifische Wärme einer Substanz unabhängig von der Temperatur sei, zu einer Skale für die Temperatur gelangen kann, und diese Methode würde ohne jene Annahme einen hohen wissenschaftlichen Wert haben. Erhitzt man ein Platinstück von bestimmtem Gewicht längere Zeit in einem Gefäße und bringt es in eine genau abgewogene Wassermenge von bestimmter Temperatur, so kann man aus der Temperaturerhöhung, welche das Wasser erfährt, auf die Temperatur des Erhitzungsgefäßes schließen. Wir würden auf eine doppelt so hohe Temperatur des Erhitzungsgefäßes schließen können, wenn dasselbe Platinstück im stande wäre, bei einer doppelt so großen Wassermenge dieselbe Temperaturerhöhung hervorzubringen oder bei derselben Wassermenge eine doppelt so große Temperaturerhöhung. Allein dieselbe Wassermenge bringt nicht immer bei einem und demselben Körper dieselbe Temperaturerhöhung hervor, sondern eine verschiedene, je nach der Anfangstemperatur des Körpers; die spezifische Wärme der Körper ist nicht unabhängig von der Temperatur, sondern wächst im allgemeinen mit zunehmender Temperatur, und zwar für die verschiedenen Körper in verschiedener Weise, so daß diese Methode eine absolute Temperaturskale zu liefern nicht im stande ist.

Das Dulong-Petitsche Gesetz. Man nimmt in der Chemie an, daß die kleinste Menge eines Elements, welche in dem Molekül einer Verbindung vorkommt, seinem Atomgewicht entspricht, und hat unter Zugrundelegung des Atomgewichts 1 für Wasserstoff die

relativen Atomgewichte der anderen Elemente bestimmt. Es hat sich nun gezeigt, daß die spezifische Wärme der Elemente im festen Aggregatzustande nahezu umgekehrt proportional ist ihrem Atomgewicht, oder daß das Produkt aus spezifischer Wärme und Atomgewicht, die Atomwärme, für die meisten Elemente im festen Aggregatzustande nahezu eine Konstante, nämlich etwa 6,4 ist. Eine wesentliche Ausnahme von diesem Gesetze, welches von Dulong und Petit gefunden worden ist und ihnen zu Ehren seinen Namen führt, bilden Kohlenstoff, Bor und Silicium, deren spezifische Wärmen aber sehr stark mit der steigenden Temperatur, wie F. Weber gezeigt hat, zunehmen, so daß ihre Atomwärmen bei sehr hohen Temperaturen sich gleichfalls jener Konstante nähern. Das Dulong-Petitsche Gesetz, dessen Gültigkeit von F. Neumann, von Regnault und besonders von Kopp auch für die im starren Aggregatzustande befindlichen Verbindungen erweitert wurde, ist für die moderne Chemie insofern von großer Bedeutung geworden, als es ein bequemes Mittel bildet, das Atomgewicht eines neuen Elements zu bestimmen, als dasjenige Multiplum des Verbindungsgewichtes, durch welches die Atomwärme am nächsten den Wert 6,4 erreicht.

Spezifische Wärmen der Gase und Dämpfe. Bei den gas- und dampfförmigen Körpern unterscheidet man zwei Arten spezifischer Wärmen, die spezifische Wärme bei konstantem Volumen und die spezifische Wärme bei konstantem Drucke. Denken wir uns die Masseneinheit eines Gases um 1° C. erwärmt, das eine Mal, indem wir seine Ausdehnung verhindern, also bei konstantem Volumen, das andere Mal, indem wir es bei konstantem Drucke sich ausdehnen lassen. Die Masse der erwärmten Substanz ist in beiden Fällen die gleiche und ebenso die Temperatur, auf welche sie erwärmt ist, nicht aber die absolute Wärmemenge, welche in beiden Fällen dem Gase mitgeteilt werden mußte. Im ersten Falle der Erwärmung bei konstantem Volumen hat die zugeführte Wärmemenge keine Arbeit zu leisten, sondern wird nur zur Erhöhung der Temperatur benutzt, im zweiten Falle dagegen, der Erwärmung bei konstantem Drucke, hat das Gas, während es sich ausdehnt, den auf ihm ruhenden konstanten Druck zu überwinden, also eine mechanische Arbeit zu leisten. Daher wird die im zweiten Falle zuzuführende Wärmemenge, die spezifische Wärme bei konstantem Drucke, größer sein müssen, als die im ersten Falle zuzuführende, die spezifische Wärme bei konstantem Volumen, und zwar nach dem im ersten Teile dieses Werkes behandelten Satze von der Erhaltung der Energie um das Wärmeäquivalent der Arbeit, welche bei der Ausdehnung geleistet wurde.

Die sorgfältigsten Versuche über die spezifische Wärme der Gase und Dämpfe bei konstantem Drucke verdanken wir Regnault, der eine schon von Lavoisier und Laplace angegebene Methode anwandte, bei welcher eine bestimmte auf höhere Temperatur erhitzte Gasmasse durch ein Kalorimeter strömte und aus der Temperaturerhöhung, welche das Kalorimeter erfuhr, die spezifische Wärme des Gases berechnet wurde.

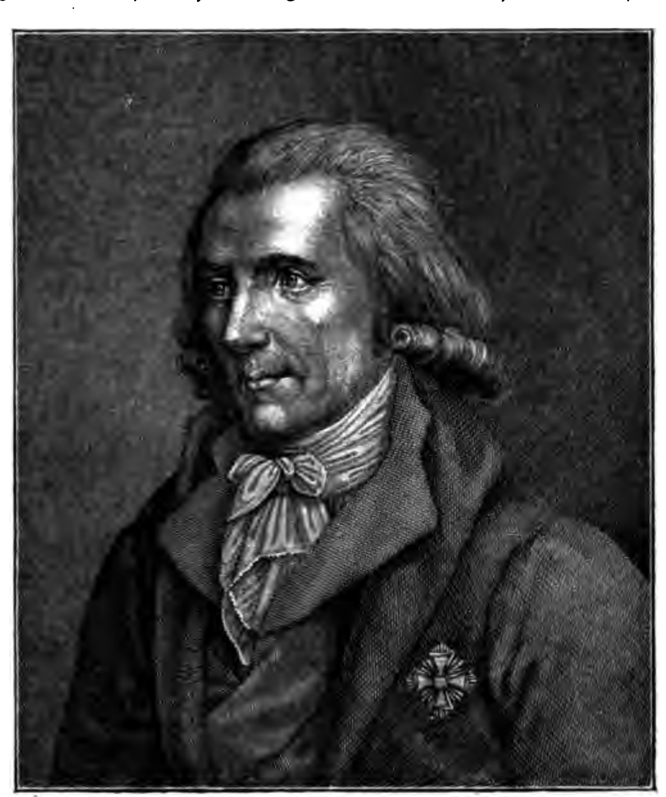
Die spezifische Wärme bei konstantem Druck beträgt für Luft 0,237, für Wasserstoff 3,410, für Wasserdampf 0,481.

Die spezifische Wärme bei konstantem Volumen läßt sich indirekt aus dem Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen ableiten. Diese für die mechanische Wärmetheorie, sowie für die Theorie der Dampfmaschine wichtige Größe, $R = \frac{C_p}{C_v}$, das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Drucke zu derjenigen bei konstantem Volumen, ist zuerst experimentell bestimmt worden von Clement und Desormes nach einer sehr schwierigen, in neuerer Zeit von Röntgen angewandten Methode, und später nach einer bequemeren, von Kundt angegebenen Methode mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit. Für trockene Luft hat sich nach diesen Versuchen im Mittel der Wert 1,41 ergeben.

Mechanische Wärmetheorie. Was das eigentliche Wesen der Wärme sei, hat seit den ältesten Zeiten die tiefsten Denker beschäftigt. Da bei fast allen physikalischen Erscheinungen Wärmeerscheinungen auftreten, so wurde man frühzeitig dahin geführt, sie für das wichtigste Agens in der Natur zu halten, und bis auf die jüngste Zeit sind die Ansichten, die man von dem Wesen der Dinge, von der Ursache und der Art ihrer Veränderungen, kurz von der sinnlich wahrnehmbaren Welt sich bildete, abhängig gewesen von der Vorstellung, die

man von dem Wesen der Wärme hatte. Und jede veränderte Vorstellung hat auf die Theorieen und Methoden der gesamten Naturforschung einen umgestaltenden Einfluß ausgeübt.

Im Altertum hielt man die Wärme und mit ihr das Feuer für ein Element, für ein äußerst feines Medium, verschieden von der materiellen Masse der Körper, in deren Poren es einzudringen im stande sei. Plato scheint schon eine unbestimmte Vorstellung davon gehabt zu haben, daß Wärme eine Art von Bewegung sei. Erst Baco von Verulam erklärt die Wärme als gewisse wellenförmige Bewegungen der kleinsten Teilchen der Körper, und Newton, der Begründer der Emanationstheorie des Lichts, pflichtete merkwürdigerweise dieser Auffassung bei, während umgekehrt Euler einen besonderen Wärmestoff annahm, eine Feuermaterie, durch deren Zutritt oder Entweichen die Körper in die verschiedenen Wärmezustände versetzt und gleichzeitig mit neuen chemischen Eigenschaften begabt würden — eine Anschauung, welche durch die Oxydationserscheinungen bei hohen Temperaturen scheinbar eine Stütze erhielt und zu einer lange herrschenden, aber irrigen chemischen Theorie führte.


598. Benjamin Thompson, Graf von Rumford.

Erst den Versuchen des Grafen Rumford gelang es, die Ansicht, nach welcher die Wärme eine Substanz sei, zu erschüttern. Er begnügte sich nicht, zunächst zu beweisen, daß der hypothetische Wärmestoff unwägbar, und daß die Annahme eines Wärmestoffs unvereinbar sei mit der täglich beobachteten Thatsache, daß Wärme durch Reibung neu entstehen kann, sondern war im stande, durch Versuche den Nachweis zu bringen, daß einzig und allein in der Reibung eine unerschöpfliche Quelle von Wärme gegeben sei. Beim Bohren von Kanonen hatte er mit Erstaunen die bedeutende Erhitzung derselben bemerkt, und indem er die Kanonen mit einem Wassermantel umgab, gezeigt, daß das Wasser durch die beim Bohren erzeugte Wärme nach kurzer Zeit zum Sieden gebracht werden konnte. Nicht minder überzeugend und ausschlaggebend als Rumfords Versuche, war der bekannte Versuch Humphrey Davys, zwei Eisstücke durch Reibung allein zum Schmelzen zu bringen. Zum Schmelzen von Eis ist, wie wir gesehen haben, eine beträchtliche Wärmemenge erforderlich. Wasser von 0° C. besitzt ferner eine spezifische Wärme, die doppelt so groß ist, als diejenige von Eis. Wird also Eis durch Reibung zum Schmelzen gebracht, so entsteht eine Flüssigkeit, welche nach der stofflichen Theorie eine viel größere Quantität von Wärmestoff enthält, als das Eis. Der Versuch ist unvereinbar mit der Annahme eines Wärmestoffs, die Wärme kann nur durch Reibung neu erzeugt sein. Wir dürfen heute nicht mehr zweifeln, daß die Wärme eine Energieform ist ebenso wie das Licht, daß sie in einer Art

von Schwingungsbewegung bestehe, in welche die kleinsten Teilchen der Körper durch verschiedene Ursachen versetzt werden.

An anderer Stelle ist gezeigt worden, daß wir im allgemeinen zwei Formen von Energie zu unterscheiden haben: Kinetische Energie, welche herrührt von den Geschwindigkeiten, welche die einzelnen Teile eines Systems besitzen, und potentielle Energie, welche von der relativen Lage der einzelnen Teile des Systems abhängt, die zwar nur der Potenz, der Fähigkeit nach vorhanden ist, aber in kinetische Energie umgesetzt werden kann. Eine gehobene schwere Masse, eine gespannte oder tordierte Feder, ein komprimiertes Gas besitzen eine bestimmte Menge potentieller Energie, welche sich unter geeigneten Umständen in kinetische Energie umsetzen und Arbeit leisten kann. Das Prinzip von der Erhaltung der Energie, welches die ganze Physik umfaßt, sagt aus, daß die Gesamtenergie irgend eines Systems während einer Bewegung stets unverändert bleibt, daß sie zwar in verschiedene Formen übergeführt, aber durch Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilen des Systems weder vergrößert noch verkleinert werden kann.



694. James Prescott Joule.

Bringen wir einen erhitzten und durch ein Gewicht gespannten Draht mit einem kälteren Körper in Berührung, so wird er einerseits an diesen Wärme abgeben, andererseits, indem er sich infolge der Abkühlung zusammenzieht, das Gewicht heben, also Arbeit leisten. Es wird also eine gewisse Energiemenge aus ihm verschwunden sein, welche sich nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie in der Erwärmung des kälteren Körpers und in der Vergrößerung der potentiellen Energie des gehobenen Gewichts wiederfinden muß. Wir werden daher von einer Energie des Drahtes sprechen können, deren absoluten Wert wir zwar nicht kennen, welche aber bei gewissen Zustandsänderungen des Drahtes meßbare Veränderungen erfährt. Da die Wärme von dem erhitzten Draht zu dem anderen Körper nicht nur durch direkte Berührung übergeht, sondern der Draht auch durch Strahlung, also durch Erregung wellenförmiger Schwingungen des ihn umgebenden Äthers, seine Wärme fortzupflanzen vermag, so werden wir einen Teil seiner Energie als kinetische Energie und als Träger derselben seine Moleküle ansehen können, welche wir uns in lebhafter Bewegung befindlich vorstellen. Man nahm lange Zeit hindurch an, daß bei gewissen mechanischen Bewegungsprozessen, z. B. beim Stoße und bei der Reibung kinetische Energie verloren gehe; die mechanische Wärmetheorie hat aber gezeigt, daß dies niemals der Fall ist, sondern daß nur eine Umwandlung in eine andere Energieform, in Molekularschwingungen, in Wärme stattfindet, daß durch jeden Verlust an kinetischer Energie oder durch jeden Aufwand von Arbeit eine bestimmte, ihr äquivalente Wärmemenge erzeugt und ebenso durch Verbrauch von Wärme eine bestimmte ihr äquivalente Arbeitsmenge geleistet wird.

Es ist das unbestreitbare und unsterbliche Verdienst des Heilbronner Arztes Julius Robert Mayer (Abb. S. 33), in seinen „Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur“ (1842) und in der größeren Abhandlung „Die organische Bewegung in ihrem

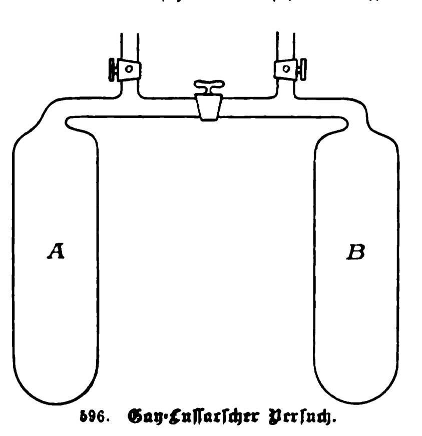
Zusammenhange mit dem Stoffwechsel" (1845) das Prinzip von der Erhaltung der Energie zuerst klar und allgemein ausgesprochen zu haben. Die konsequente, strenge und mathematische Durchführung des Prinzips auf allen Gebieten der Physik ist aber erst von Hermann Helmholtz in seiner berühmten Schrift „Über die Erhaltung der Kraft" (1847) dargelegt worden. Robert Mayer hat auch als erster 1842 in genialer Weise das mechanische Wärmeäquivalent berechnet. Den genauen Wert desselben hat aber erst der Engländer James Prescott Joule 1843 durch seine klassischen Experimente geliefert. Mayer und Joule bilden, wie Tyndall treffend sagt, am Firmamente der Wissenschaft ein Doppelgestirn, in gewissem Sinne ist das Licht des einen dem des anderen komplementär. Wir haben gesehen, daß durch Reibung mechanische Energie verbraucht und dafür Wärme erzeugt wird. Joule hat Versuche angestellt, bei denen sowohl die durch Reibung erzeugte Wärmemenge, als auch die dabei verbrauchte mechanische Energie gemessen werden konnte. Eine mit Flügeln versehene Achse wurde durch sinkende Gewichte in einem Wasserkalorimeter in Rotation gesetzt, die verbrauchte Energie wurde durch das Produkt aus Gewicht und Fallhöhe, die durch Reibung erzeugte Wärme im Kalorimeter mittels des Thermometers gemessen. Diese Reibungsversuche wurden später von Joule mannigfach variiert, indem Wasser, Walratöl und Quecksilber als kalorimetrische Flüssigkeiten angewandt wurden, und indem er feste Körper, z. B. zwei gußeiserne Scheiben in Quecksilber rotieren und an einander sich reiben ließ. Er fand, daß die gewonnene Wärmemenge stets proportional war der aufgewendeten Energie. Joule beschränkte sich aber nicht auf die Untersuchungen der Wärmeentwickelung bei der Reibung, sondern dehnte sie auch aus auf die Bestimmung der Wärmeentwickelung bei anderen physikalischen Erscheinungen.

Ein Gas kühlt sich bei seiner Ausdehnung ab und erwärmt sich bei der Kompression. Bringen wir unter die Glocke einer Luftpumpe ein Breguetsches Metallthermometer, so beobachten wir beim plötzlichen Evakuieren am Thermometer eine Temperaturerniedrigung, welche in der Regel von einer Nebelbildung begleitet ist, weil der in der Luft der Glocke enthaltene Wasserdampf infolge der plötzlichen Abkühlung sich nicht mehr in dampfförmigem Zustande halten kann, sondern sich in Form eines Nebels niederschlägt. Läßt man durch Drehung des Pumpenhahnes von außen her wieder Luft in die evakuierte Glocke ausströmen, so zeigt das Thermometer eine Temperaturzunahme.

595. Pneumatisches Feuerzeug.

Auf der Temperaturerhöhung der Luft bei ihrer Kompression beruht die Wirkungsweise des pneumatischen Feuerzeugs. Es besteht aus einem dickwandigen, unten mit einem starken Metallfuß versehenen Glascylinder G (Abb. 595), in welchem ein luftdicht schließender Kolben K verschiebbar ist, an dessen unteres Ende etwas Feuerschwamm befestigt werden kann. Wird der Kolben durch einen kräftigen Ruck in den mit Luft gefüllten Cylinder hineingestoßen, so tritt infolge der Luftkompression eine so bedeutende Temperaturerhöhung ein, daß der Schwamm unter Auftreten eines Feuerblitzes sich entzündet.

Strömt ein Gas in einen leeren Raum aus, so findet dabei eine Temperaturänderung nicht statt. Gay-Lussac hat diese wichtige Thatsache durch ein einfaches Experiment bewiesen, welches von Joule wiederholt worden ist. Läßt man aus dem Gefäße A (Abb. 596), in welchem sich komprimierte Luft befindet, diese in ein gleich großes luftleeres Gefäß B ausströmen, so kühlt sich dieselbe im ersten Gefäße genau so viel ab, als



596. Gay-Lussacscher Versuch.

sie sich im zweiten erwärmt. Befinden sich beide Gefäße in **einem** Wasserkalorimeter, so bleibt die Temperatur des Wassers, also auch der Luft unverändert. **Zur Ausdehnung des Gases an und für sich ist also kein Wärmeaufwand erforderlich, wohl aber erleidet das Gas eine Temperaturerniedrigung, wenn es sich unter Druck ausdehnt.**

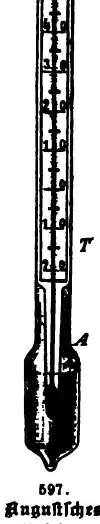
Joule verglich die bei der Kompression der Luft gewonnene Wärme mit der dabei aufgewendeten Arbeit und ebenso die gewonnene Arbeit mit dem bei der Ausdehnung der Luft auftretenden Wärmeverluste und fand auch bei diesem Versuche einen bestimmten quantitativen Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit. Weiter fand er, daß die bei gewissen magnetoelektrischen Erscheinungen auftretende Wärme der aufgewendeten Energie proportional ist. Aus allen seinen Versuchen, welche durch die Versuche anderer Forscher, z. B. Hirn in Logelbach im Elsaß, Kupffer in Petersburg bestätigt wurden, konnte man schließen, daß Wärme und mechanische Energie nach festen Verhältnissen in einander verwandelt werden können, und daß Wärme also eine Form von Energie ist. Man nennt diejenige Arbeitsgröße, welche der Wärmeeinheit äquivalent ist, das **mechanische Äquivalent der Wärme**. Unter Berücksichtigung der neueren Arbeiten hat man als den mittleren Wert des mechanischen Äquivalents einer Kilogrammkalorie im Gravitationsmaße 425 Kilogrammmeter angenommen, d. h. also die Arbeit, welche geleistet wird, wenn 1 kg 425 m hoch gehoben wird. Das mechanische Äquivalent einer Grammkalorie im Gravitationsmaße, d. h. also die Arbeitsgröße, welche äquivalent ist derjenigen Wärmemenge, welche die Temperatur von 1 g destillierten Wassers von 0° auf 1° erhöht, beträgt demnach 0,425 Kilogrammmeter oder 42 500 Grammzentimeter.

Robert Mayers Berechnung des mechanischen Wärmeäquivalents. In seiner oben erwähnten, berühmten Abhandlung **berechnet** nun Robert Mayer das mechanische Wärmeäquivalent in folgender ebenso einfacher, wie geistvoller Weise: Die spezifische Wärme der atmosphärischen Luft bei konstantem Drucke ist, wie wir gesehen haben, 0,237. Das Gewicht eines Kubikzentimeter Luft bei 0° C. und 76 cm Barometerstand beträgt 0,001293 g; die Wärmemenge, deren ein Kubikzentimeter Luft bedarf, um bei konstantem Druck von 0° auf 1° C. erwärmt zu werden, ist also der Wärmemenge gleich, welche $0{,}001293 \cdot 0{,}237 = 0{,}0003064$ g Wasser von 0° auf 1° C. zu erwärmen im stande ist. Wenn Luft bei konstantem Druck um 1° C. erwärmt wird, so dehnt sie sich um $\frac{1}{273}$ ihres Volumens bei 0° aus, hebt somit eine Quecksilbersäule von 1 qcm Grundfläche und 76 cm Höhe um $\frac{1}{273}$ cm. Da das Gewicht dieser Quecksilbersäule 1033 g beträgt, so ist die geleistete Arbeit gleich $\frac{1033}{273} = 3{,}783883$ Grammzentimeter. Das Verhältnis der spezifischen Wärme der Luft bei konstantem Drucke zu derjenigen bei konstantem Volumen ist nun 1,41; folglich ist die Wärmemenge, deren 1 Kubikzentimeter Luft bedarf, um bei konstantem Volumen um 1° C. erwärmt zu werden $\frac{0{,}0003064}{1{,}41} = 0{,}0002173$ Grammkalorieen. Die Differenz der beiden Wärmemengen $0{,}0003064 - 0{,}0002173 = 0{,}0000891$ Grammkalorieen sind demnach aufgewendet worden, um die Arbeit von 3,783883 Grammzentimeter zu leisten, und hieraus berechnet sich, daß 1 Grammkalorie die Arbeitsmenge $\frac{3{,}783883}{0{,}000891} = 42468$ Grammzentimeter oder von 0,42468 Kilogrammmeter äquivalent ist. Dieser von Mayer*) berechnete Wert stimmt mit dem später von Joule auf experimentellem Wege gefundenen überein.

Latente Wärme. Wir haben bisher fast ausschließlich die Druck- und Volumenveränderungen behandelt, welche feste, flüssige und gasförmige Körper unter der Einwirkung der Wärme erfahren. Außer dieser volumenverändernden Wirkung sind die den Aggregatzustand der Körper verändernden Einwirkungen der Wärme von großer Wichtigkeit. Die meisten festen Körper können bei genügender Erwärmung in den flüssigen Aggregatzustand und bei weiterer Erwärmung in den gasförmigen übergeführt werden. Wenn wir ein Stück Eis, welches die Temperatur von — 5° C. haben möge, erwärmen, so steigt, wie

*) Der ursprünglich von Mayer gefundene Wert war 0,367 Kilogrammmeter, weil er seiner Berechnung nicht den richtigen Wert 0,237 für die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Drucke, sondern den ungenauen Wert 0,267 zu Grunde gelegt hatte.

uns das Thermometer zeigt, seine Temperatur bis auf 0° C., bei welcher es zu schmelzen beginnt. Von da ab behält das Thermometer einen konstanten Stand, auch wenn wir immer von neuem dem Eis Wärme zuführen, so lange, bis alles feste Eis zu Wasser geschmolzen ist. Nun beginnt das Quecksilber im Thermometer wieder zu steigen, und zwar immer höher, je weiter wir das Wasser erwärmen, bis es zu sieden und in den dampfförmigen Zustand überzugehen beginnt. Jetzt nimmt das Thermometer wieder, während das Wasser durch die sich entwickelnden Dampfblasen in kochendes Aufwallen gerät, einen stationären Stand an, den es, so viel Wärme wir auch dem siedenden Wasser noch zuführen mögen, so lange behält, als überhaupt noch flüssiges Wasser vorhanden ist. Die gleiche Erscheinung, welche wir beim Schmelzen des Eises und beim Verdampfen des Wassers beobachten, daß nämlich die zugeleitete Wärme, solange noch festes Eis oder flüssiges Wasser vorhanden ist, scheinbar verschwindet, thatsächlich aber ausschließlich verbraucht wird, um den Körper aus dem einen Aggregatzustand in den anderen überzuführen, können wir bei allen Körpern, welche eine ähnliche Umwandlung gestatten, beobachten, z. B. beim Quecksilber, beim Zink, beim Schwefel, beim Phosphor u. s. w. Diese von den Körpern absorbierte Wärme, welche wir latente Wärme nennen, weil sie durch das Thermometer nicht nachweisbar ist, wird wieder frei und wahrnehmbar, wenn die Körper umgekehrt aus dem gasförmigen in den flüssigen, oder aus dem flüssigen in den festen Zustand übergeführt werden. Man nennt die Anzahl von Grammkalorieen, welche zur Schmelzung von 1 g der Substanz erforderlich sind, die latente Schmelzwärme und die Anzahl Grammkalorieen, welche zur Verdampfung von 1 g flüssiger Substanz erforderlich sind, die latente Verdampfungswärme der Substanz. Die latente Schmelzwärme für Eis ist, wie wir bereits gesehen haben, 80, d. h. es sind 80 Grammkalorieen nötig, um 1 g Eis von 0° in Wasser von 0° C. zu verwandeln. Am leichtesten wird dies durch den Blackschen Versuch gezeigt: Gießt man in ein Glasgefäß, welches 1 kg Schnee von 0° C. enthält, ein kg Wasser von 80° C., so erhält man 2 kg Wasser von der Temperatur 0° C. Nach der Mischungsmethode bestimmt, ist die latente Schmelzwärme für Quecksilber 2,8, für Blei 6,0, für Zinn 13, für Silber 21, für Platin 27, für Zink 28. Die latente Verdampfungswärme des Wassers ist dagegen 536, d. h. es sind 536 Grammkalorieen nötig, um 1 g Wasser von 100° C. in Dampf von derselben Temperatur zu verwandeln.



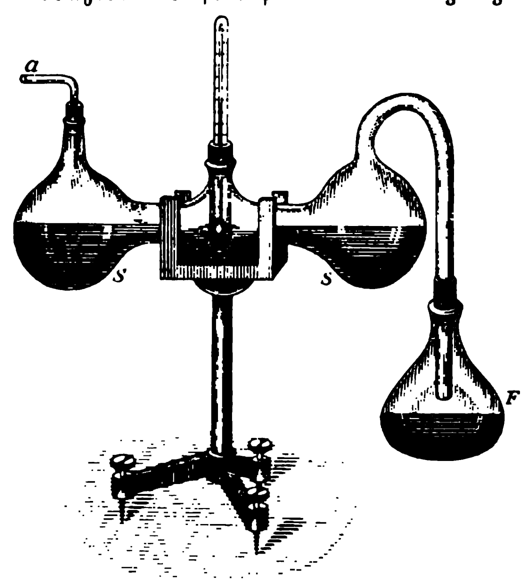
597. Augustsches Gefrierthermometer.

Der Schmelzpunkt ist verschieden bei den verschiedenen Körpern und wird auch für einen und denselben Körper durch Erhöhung des Druckes beeinflußt, und zwar wird er durch stärkeren Druck erhöht oder erniedrigt, je nachdem der Körper beim Erstarren sein Volumen verkleinert oder vergrößert. Der Schmelzpunkt des Zinns liegt bei 232, der des Wismuts bei 267, des Kadmiums bei 320, des Bleis bei 328, des Aluminiums bei 620, des Silbers bei 950, des Goldes bei 1070, des Kupfers bei 1080, des Palladiums bei 1500, des Platins bei 1800° C. Bemerkenswert ist, daß bei manchen leicht schmelzbaren Legierungen der Schmelzpunkt viel tiefer liegt, als der Schmelzpunkt des am leichtesten schmelzbaren Bestandteils der Legierung. So liegt z. B. der Schmelzpunkt der sogenannten Roseschen Legierung (2 Teile Wismut, 1 Teil Blei, 1 Teil Zinn) bei 95 und der Woodschen Legierung (1 Teil Kadmium, 1 Teil Zinn, 2 Teile Blei, 4 Teile Wismut) bei 68° C.

Die Schmelzpunkte von Metallen und Metalllegierungen werden in der Praxis häufig als Fixpunkte zur Bestimmung höherer Temperaturen benutzt. So sind z. B. die von der deutschen Gold- und Silberscheideanstalt vorm. Rößler in Frankfurt a. M. hergestellten Metallpyrometer in der Form von Serien von Streifen sowohl aus den soeben erwähnten, reinen Metallen, als auch deren Legierungen in Gebrauch, und zwar Silber-Kupferlegierungen (für 820—900), Silber-Goldlegierungen (für 1020) und Gold-Platinlegierungen (für 1100—1730° C.), je nach dem Prozentgehalte der komponierenden Bestandteile von 30 zu 30° fortschreitend.

Unterkühlung. Wasser kann unter gewissen Umständen weit unter den Eispunkt abgekühlt werden, ohne daß es erstarrt. Dies läßt sich mittels des Augustschen Gefrierthermometers zeigen. An das Umhüllungsrohr des Quecksilberthermometers T (Abb. 597) ist das mit ausgekochtem, luftfreien destillierten Wasser gefüllte Gefäß A angeschmolzen. Man kann dasselbe bis auf — 10° C. abkühlen, ohne daß das Wasser erstarrt, dann aber durch eine Erschütterung das Wasser zum Gefrieren bringen, wobei infolge des Freiwerdens der latenten Schmelzwärme der Quecksilberfaden des Thermometers sofort auf 0° steigt.

Molekulargewicht und Schmelzpunktserniedrigung. Raoultsches Gesetz. In neuerer Zeit ist das Studium der Schmelz- und Gefrierpunktserniedrigung von Lösungen für die Chemie von großer Bedeutung geworden. Der Gefrierpunkt eines Lösungsmittels wird durch Auflösung einer Substanz erniedrigt und zwar proportional der Menge der Substanz und umgekehrt proportional der Menge des Lösungsmittels, wenn die Konzentration der Lösung nicht zu stark wird. Man nennt spezifische oder reduzierte Gefrierpunktserniedrigung diejenige, welche 1 g Substanz in 100 g Lösungsmittel bewirkt. Raoult hat nun das Gesetz gefunden, daß für ein und dasselbe Lösungsmittel die reduzierte Gefrierpunktserniedrigung, welche eine Substanz hervorbringt, ihrem Molekulargewicht umgekehrt proportional ist, oder daß für ein und dasselbe Lösungsmittel das Produkt aus dem Molekulargewicht M und der reduzierten Gefrierpunktserniedrigung e eine von der Natur der gelösten Substanz unabhängige Konstante C ist. $M \cdot e = C$. Das Gesetz bietet also ein Mittel, aus der von einer Substanz hervorgebrachten reduzierten Gefrierpunktserniedrigung ihr Molekulargewicht zu bestimmen. Für Essigsäure ist $C = 39$, für Benzol 49, für Naphthalin 92. Wendet man also Essigsäure als Lösungsmittel an, so erhält man das Molekulargewicht einer Substanz, wenn man die von ihr hervorgebrachte spezifische Gefrierpunktserniedrigung durch 39 dividiert.



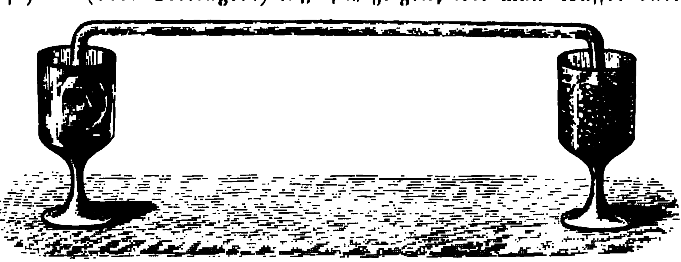
598. Wassergefrierapparat.

Weitere Wärmeerscheinungen bei Änderung des Aggregatzustandes. Die latente Schmelz- und Verdampfungswärme bietet uns den Schlüssel zur Erklärung vieler interessanter und wichtiger Wärmeerscheinungen, welche bei Veränderungen des Aggregatzustandes der Körper auftreten. Schüttet man Salpeter oder Salmiak in Wasser, so tritt eine bedeutende Temperaturerniedrigung ein, weil die zur Auflösung des Salpeters oder des Salmiaks erforderliche Wärme ihnen und dem Wasser entzogen wird. Man kann auf diese Weise leicht eine Kältemischung von — 5° bis — 10° C. erzielen. Eine bei weitem intensivere Kälte erhält man durch Mischung von klein gestoßenem Eis und Kochsalz. Beide Körper ändern dabei ihren Aggregatzustand und bilden eine Salzlösung; hierzu wird die latente Schmelzwärme des Eises wie des Salzes verbraucht, welche der Lösung entzogen wird. Durch eine Mischung von 100 Gewichtsteilen Eis und 33 Gewichtsteilen Kochsalz kann man eine Temperatur von — 21° C., und durch geeignete Mischungen von Chlorcalcium mit Schnee oder klein zerstoßenem Eise noch viel tiefere Temperaturen bis zu — 50° C. erhalten. Körper, welche rasch verdunsten, aus dem flüssigen Zustande rasch in den gasförmigen übergehen, absorbieren bei diesem Vorgange große Wärmemengen und sind im stande, die benachbarten Körper, denen sie ihre Wärme entziehen, dadurch bedeutend abzukühlen. Durch die sogenannte Verdunstungskälte können wir

Wasser zum Gefrieren bringen, wenn wir ein damit angefülltes Gefäß über Schwefelsäure unter den Rezipienten einer Luftpumpe stellen und durch fortgesetztes Auspumpen die sich entwickelnden Wasserdämpfe rasch wieder entfernen, so daß an der Oberfläche fortwährend neue Dämpfe sich entwickeln. Der Versuch läßt sich bequem mit dem in Abb. 598 dargestellten Apparat zeigen. Das Wasser in der Flasche F, welche behufs Absorption der Wasserdämpfe mit dem Schwefelsäuregefäß S S in Verbindung steht, gefriert, wenn man die Röhre a mit der Luftpumpe in Verbindung bringt und evakuiert. Diese Verdunstung im luftleeren Raume wird bei den Eismaschinen benutzt. Ammoniak oder schweflige Säure oder ein Gemisch von Kohlensäure und schwefliger Säure wird durch eine Heizvorrichtung zum Verdampfen gebracht und durch Pumpen angesaugt.

Wir empfinden ein Kältegefühl, wenn wir dem Bade entsteigen, weil das an uns haftende Wasser verdunstet und die zu seiner Verdunstung nötige Wärme unserem Körper entzieht; wir fühlen auf unserer Hand die kühlende Wirkung rasch verdunstenden Alkohols und sprengen bei großer Hitze die Fußböden unserer Zimmer mit Wasser, um der lästigen Wärme Gelegenheit zu geben, sich in dem Dampfe desselben auf eine uns unmerkbare Weise zu binden. Umgekehrt wird die Wärme wieder frei bei der Änderung der Aggregatzustände im entgegengesetzten Sinne, wenn die in der Luft schwebenden Wasserdämpfe sich zu Tröpfchen verdichten, oder die als Nebel und Wolken in der Luft schwimmenden Flüssigkeitströpfchen sich in feste Eis- und Schneenadeln verwandeln.

Mittels des Kryophors (oder Eisträgers) läßt sich zeigen, wie man Wasser durch seine eigene Verdampfung und die dadurch bedingte Abkühlung zum Gefrieren bringen kann. Zwei Glaskugeln, von denen die eine A etwa bis zur Hälfte mit destilliertem Wasser gefüllt ist, sind durch eine zweimal gebogene Glasröhre mit einander verbunden. Die Füllung erfolgte vor dem Zuschmelzen der leeren, in eine kleine Spitze endigenden Kugel wie beim Thermometer, indem das Wasser zum Sieden gebracht und durch den dabei entwickelten Dampf alle Luft ausgetrieben ist. Alsdann wird die Spitze zugeschmolzen, so daß der Apparat außer dem in der Kugel A enthaltenen Wasser nur noch Dampf enthält. Bringt man nun die leere Kugel (die sogenannte Kondensatorkugel) in eine Kältemischung (Abb. 599), so verdichtet sich der in ihr enthaltene Wasserdampf zu Wasser, und es können sich aus dem Wasser der Kugel A neue Dämpfe entwickeln, die wieder in der anderen Kugel zu Wasser verdichtet werden u. s. f. Infolge der andauernden Verdunstung wird dem Wasser so viel Wärme entzogen, daß es nach einiger Zeit gefriert. Ein weiteres Beispiel für den großen Wärmeverbrauch bei Änderung des Aggregatzustandes liefert die flüssige Kohlensäure, welche in starken, schmiedeeisernen Flaschen (Abb. 600) sicher aufbewahrt werden kann und in dieser Form in neuerer Zeit so vielfache praktische Verwendung findet. Wird der die Flasche verschließende Hahn g geöffnet, so strömt die Kohlensäure, von bedeutendem Druck (bei Zimmertemperatur etwa 50 Atmosphären) entlastet, mit großer Heftigkeit und mit zischendem Geräusche aus, und man erhält mit dem Gasstrom zugleich eine weiße, schneeförmige Masse, welche feste Kohlensäure ist. Beim Öffnen des Hahnes geht die flüssige Kohlensäure sofort in den gasförmigen Zustand über, und bei dieser Änderung des Aggregatzustandes findet eine so bedeutende Temperaturerniedrigung statt, daß ein Teil der Kohlensäure sofort zu Schnee gefriert. Derselbe läßt sich durch Druck zu ganz festen Stücken pressen. Durch ein Gemisch von fester Kohlensäure mit abgekühltem Alkohol oder Äther kann man eine Temperatur von — 80° C. erzielen und verhältnismäßig lange Zeit konstant erhalten. Man kann in einer solchen

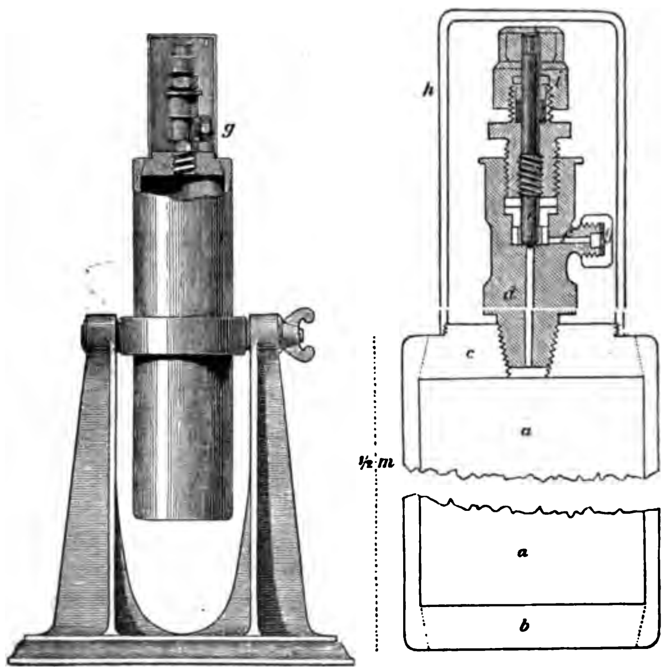


599. Kryophor.

Kältemischung leicht größere Mengen Quecksilber zum Erstarren bringen und das feste Quecksilber mit dem Hammer bearbeiten.

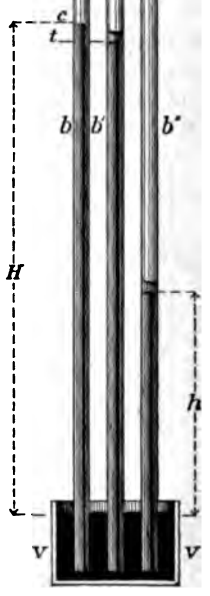
Trotz ihrer tiefen Temperatur kann man feste Kohlensäure, ohne Schaden in die Hand nehmen, nur darf man sie nicht zu fest anfassen; infolge ihrer starken Verdunstung bildet sich nämlich zwischen der festen Kohlensäure und der Hand eine Art Dampfkissen, welches diese vor dem Verbrennen schützt; in derselben Weise bildet sich, wenn man ein Wassertröpfchen auf eine weißglühende Eisenplatte fallen läßt, infolge der Verdunstung des Wassers, ein Wasserdampfkissen, welches eine innige Berührung zwischen Platte und Tropfen verhindert (Leidenfrostsches Phänomen).

Gesättigte Dämpfe. Denken wir uns drei mit reinem, trockenen Quecksilber gefüllte und durch Auskochen von Luft befreite Torricellische Röhren b, b', b'' mit den offenen Enden in ein weites Quecksilbergefäß getaucht, in die mittlere derselben, b', mittels einer gekrümmten Pipette etwas Wasser und in die Röhre b'' etwas Schwefeläther hineingebracht (Abb. 601), so steigen alsbald die Flüssigkeiten bis zum Torricellischen Vakuum in die Höhe, und die Niveaus der Quecksilbersäulen werden herabgedrückt, beim Wasser etwa um 17 mm, beim Äther um 433 mm, wenn die Zimmertemperatur etwa 20° C. beträgt. Die kleinen Flüssigkeitssäulen können diese Drucke nicht ausüben, sie werden ausgeübt von dem unsichtbaren Wasser- resp. Ätherdampf, welche sich aus dem Wasser, resp. aus dem Äther entwickelt haben. Die Größe der Depression liefert uns zugleich ein Maß für die Spannkraft des Wasser- resp. des Ätherdampfes. Die Dämpfe besitzen das Bestreben, sich soweit als möglich auszudehnen; eine noch so kleine Menge Dampfes dehnt sich in einem leeren Raume, so groß er auch sein mag, nach allen Seiten aus und übt auf die Wände desselben stets noch einen mehr oder minder großen Druck aus; das kleinste Tröpfchen Wasser vermag in Form von Wasserdampf ebenso wie die Luft einen Raum von Tausenden von Kubikmetern auszufüllen. Trotz der ins unendliche gehenden Expansionsfähigkeit der Dämpfe läßt sich indessen ihre Spannkraft durch Vermehrung des Druckes nicht über eine gewisse Grenze steigern. Diese Thatsache bildete früher den charakteristischen — heute nur einen graduellen — Unterschied zwischen den Dämpfen und den sogenannten permanenten Gasen, von denen man annehmen zu können glaubte, daß ihre Elastizität in demselben Maße zunehme, in welchem man ihr Volumen durch Druck verkleinere. Für die Dämpfe existiert ein Maximum der Spannkraft. Dies läßt sich leicht in folgender Weise zeigen: Bringen wir eine der beiden Röhren, z. B. b'' in ein tieferes, mit Quecksilber gefülltes Gefäß, so daß wir sie tiefer einsenken können, so beobachten wir, daß die Flüssigkeitsmenge zunimmt, daß sich also ein Teil des Ätherdampfes wieder kondensiert, und daß der Dampfraum sich infolgedessen verkleinert, daß aber die Quecksilbersäule h über dem Niveau unverändert dieselbe bleibt. Der Druck des Dampfes, also auch seine



600. Schmiedeeiserne Flasche für flüssige Kohlensäure.

Dichte bleiben konstant. Der Raum über der Flüssigkeit ist mit Dampf von bestimmtem Drucke und bestimmter Dichtigkeit erfüllt, welche nicht vergrößert werden können, solange die Temperatur unverändert bleibt. Dies gilt jedoch nur, solange der Dampf noch gesättigt ist, d. h. solange er noch in Berührung mit seiner Flüssigkeit steht. Ziehen wir die Röhre aus dem Quecksilbergefäße heraus, vergrößern also den Dampfraum, dann wird die Flüssigkeitsmenge durch Verdampfen des Äthers wieder kleiner, und ist das letzte Tröpfchen verdampft, dann nimmt der Druck bei Volumenvergrößerung des Dampfraumes ab, bei Volumenverminderung zu, gemäß dem Mariotteschen Gesetze. Solcher Dampf, dessen Druck sich mit dem Volumen nach dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetze ändert, heißt ungesättigter oder überhitzter Dampf. Die Spannkraft desselben ist geringer, als die des gesättigten Dampfes bei derselben Temperatur. Solcher Dampf dagegen, der den größten Druck ausübt, welchen er, ohne kondensiert zu werden, erträgt, heißt gesättigter Dampf und sein Druck Sättigungsdruck. Gesättigter Dampf besitzt also bei gegebener Temperatur, unabhängig vom Volumen, das Maximum der Spannkraft. Verkleinern wir das Volumen, so kondensiert sich entsprechend der Dampf, vergrößern wir es, so bildet sich entsprechend mehr Dampf. Ändern wir aber die Temperatur des gesättigten Dampfes, so ändert sich auch der Sättigungsdruck, und zwar nimmt er mit steigender Temperatur zu. Ferner ist er abhängig von der Natur der Substanz und zwar um so größer, je flüchtiger die Substanz ist.



601. Zum Nachweis des Maximums der Spannkraft.

Es ist von vielen Forschern, z. B. von James Watt, hauptsächlich aber von G. Magnus und V. Regnault, versucht worden, die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes als Funktion der Temperatur darzustellen, doch ist es bisher nicht gelungen, eine einfache, den Zusammenhang darstellende Formel aufzustellen. Am besten und einfachsten benutzt man die aus den Experimental-Untersuchungen direkt abgeleiteten Spannkraftstabellen, wie sie z. B. von Regnault für Wasserdampf aufgestellt sind, aus denen man für eine bestimmte Temperatur den zugehörigen Sättigungsdruck entnehmen kann.

Folgendes sind die Sättigungsdrucke (ausgedrückt in mm Quecksilber) von Wasser, Alkohol, Äther für die danebenstehenden Temperaturen:

	Wasser	Äthylalkohol	Äthyläther
0	4,56	12,5	185
20	17,4	44,1	440
40	54,9	133,6	910
60	148,9	351	1730
80	355,4	812	3000
100	760	1690	4900
120	1490		
140	2730		
160	4650		
180	7550		
200	11700		

Die Methoden, Dampf zur Arbeitsleistung zu benutzen, und die auf ihnen beruhenden Maschinen, welche durch Wärme Arbeit erzeugen, sollen an anderer Stelle behandelt werden.

Wir wollen hier nur noch eine kalorimetrische Aufgabe anschließen, nämlich die Bestimmung der Verbindungswärme.

Wenn Wasser und Sauerstoff von einander getrennt sind, so besitzen sie zu einander potentielle Energie, welche bei der Vereinigung beider sich in Wärme umsetzt, wodurch die Verbrennung erzeugt wird. Wir können nach der Wärme fragen, welche bei der Vereinigung produziert wird. Man nennt Verbindungswärme diejenige Wärmemenge, welche durch die chemische Verbindung zweier Körper erzeugt wird; sie ist gleich derjenigen Wärmemenge, die erforderlich ist, um die Verbindung wieder in ihre Bestandteile zu zerlegen. Hierbei kann ein Teil der bei der Verbindung freiwerdenden Energie nicht als Wärme, sondern in Form von Elektrizität auftreten, und ebenso ein Teil der zur Zerlegung erforderlichen Energiemenge in Form von Elektrizität zugeführt werden.

Verbrennungswärme nennt man diejenige Wärmemenge, die durch Oxydation der Masseneinheit des Körpers erzeugt wird. Die Verbrennungswärme des Wasserstoffs beträgt z. B. 34 444 Wärmeeinheiten; d. h. durch Verbrennung von 1 g Wasserstoff werden 34 444 Grammkalorieen erzeugt.

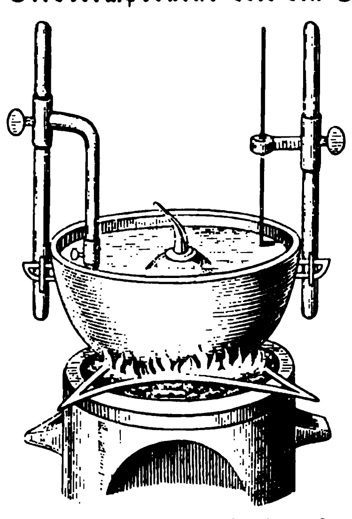
Wärmetönung nennt man diejenige Wärmemenge (in Grammkalorieen), welche bei einer chemischen Reaktion entwickelt oder verbraucht wird, wenn die Anzahl der Masseneinheiten (Gramm) der an der Reaktion teilnehmenden Körper gleich ihrer Atomgewichtszahl ist.



602. Pulshammer.

Z. B. entwickeln 2 g Wasserstoff bei der Verbrennung mit 16 g Sauerstoff zu Wasser 68 888 Grammkalorieen; 12 g Kohlenstoff entwickeln bei der Verbrennung mit 32 g Sauerstoff zu Kohlensäure 96 568 Grammkalorieen. Die Verbrennungswärmen können und sind auf kalorimetrischem Wege bestimmt worden von Favre und Silbermann, von Andrews, Berthellot u. a. Bei der Verbrennung von Knallgas zu Wasser erhält man die höchste uns bekannte Temperatur.

Sieden. Wird eine Flüssigkeit erhitzt bis zu der Temperatur, bei welcher die Spannkraft ihres gesättigten Dampfes so groß ist, als der Druck der über der Flüssigkeit lastenden Atmosphäre, dann beginnt sie zu sieden, d. h. es können Dampfblasen, die sich im Innern der Flüssigkeit entwickeln, emporsteigen. Man nennt jene Temperatur die Siedetemperatur oder den Siedepunkt der Flüssigkeit. Er ist, wie wir schon beim Wasser gesehen haben, abhängig vom Druck, und man pflegt ihn auf den Normaldruck von 76 cm zu beziehen. Bei dem sogenannten Wasser- oder Pulshammer, einer mit Kugeln versehenen, mit ausgekochtem Wasser oder Alkohol zum Teil gefüllten, sonst aber luftleeren Röhre (Abb. 602), kann man den Alkohol, resp. das Wasser schon durch die Handwärme zum Sieden bringen. Unter der Glocke der Luftpumpe bei einem Druck von 4,5 mm siedet Wasser bei 0° C., auf dem St. Gotthard (2175 m) bei 92,9° C., auf dem Montblanc (4810 m) bei 84° C.



603. Dumas' Methode der Dampfdichtebestimmung.

Der Siedepunkt ist ferner abhängig von der Natur der Substanz; er liegt beim Alkohol bei 78,3° C., beim Äther bei 34,9° C., beim Quecksilber bei 357° C.

Salzlösungen haben einen geringeren Sättigungsdruck als reines Wasser, ihr Siedepunkt liegt deshalb höher als der des Wassers. Gesättigte Kochsalzlösung z. B. siedet bei 108° C.

Dampfdichte nennt man das Verhältnis der Dichtigkeit eines Dampfes zur Dichtigkeit der trockenen atmosphärischen Luft bei demselben Drucke und bei derselben Temperatur.

Nach der Dumasschen Methode bringt man einige Gramm der zu bestimmenden flüssigen Substanz in einen in eine feine Spitze ausgezogenen Glasballon und diesen in ein Flüssigkeitsbad, dessen Temperatur etwa 20° höher ist als die Siedetemperatur der Substanz (Abb. 603). Haben die Dämpfe der siedenden Flüssigkeit alle Luft aus dem Ballon vertrieben, und ist der gesättigte Dampf, welchen der Ballon dann enthält, durch weiter fortgesetzte Erhitzung in überhitzten Dampf verwandelt, so schmelzt man den Ballon zu und liest den Barometerstand b und die Temperatur t des Bades ab. Aus dem Gewichte des mit Dampf gefüllten und dem Gewicht des mit Luft gefüllten Ballons erhält man die Dampfdichte, bezogen auf Luft, welche man auf 0° C. und 76 cm Druck reduziert. Ist das Volumen des Ballons durch Wasser- oder Quecksilberfüllung bestimmt, so erhält man die Dampfdichte bezogen auf Wasser.

Bei der in neuerer Zeit vorzugsweise angewandten Viktor Meyerschen Dampfdichtebestimmungsmethode wird das Dampfvolumen einer kleinen abgewogenen Substanzmenge aus der bei ihrer Verdampfung verdrängten Luftmenge bestimmt. Ein Glas- oder Porzellangefäß G (Abb. 604) mit Steigrohr und engem Gasentbindungsrohr R wird im Luft- oder Dampfbad H auf einer weit über den Siedepunkt der zu untersuchenden Substanz gelegenen Temperatur T erhalten. Entweichen aus dem Entbindungsrohr unter Wasser keine Luftblasen mehr, so ist die Temperatur konstant geworden. Stülpt man nun über das offene Ende von R das mit Wasser gefüllte, geteilte und kalibrierte Meßrohr M, läßt das mit abgewogener Substanzmenge gefüllte Glasfläschchen g in das Gefäß G hineinfallen und verschließt darauf schnell das obere Ende, so wird der Inhalt des Fläschchens in überhitzten Dampf verwandelt, welcher ein dem seinen gleiches Volumen Luft aus G verdrängt. Dieses wird in M aufgefangen. Ist v das gemessene Luftvolumen in Kubikzentimeter, m die Masse der Substanz in Gramm, t die Lufttemperatur und p der Druck, unter welchem die gemessene Luft steht, in mm Quecksilber bei 0° C.,

so ist die gesuchte Dampfdichte $d = \frac{m}{v} \frac{760}{p} \frac{1 + 0{,}004\,t}{0{,}001293}$.

Dampfdichte und Molekulargewicht. Die Bestimmung der Dampfdichte ist für die Physik und besonders für die Chemie von großer Wichtigkeit, da sie ein Hilfsmittel zur Bestimmung des Molekulargewichts liefert. Nach dem Avogadroschen Prinzip enthalten nämlich gleiche Volumina verschiedener Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl Moleküle. Ist N diese Anzahl, v das Volumen, sind M_1, M_2, M_3, ... die Molekulargewichte und d_1, d_2, d_3, ... die entsprechenden Dichten, so besteht die Gleichung

$$\frac{N M_1}{v} : \frac{N M_2}{v} : \frac{N M_3}{v} : \ldots = d_1 : d_2 : d_3 : \ldots$$

Die Dichten verhalten sich also direkt wie die entsprechenden Molekulargewichte. Man ist überein gekommen, das Molekulargewicht des Wasserstoffs, dessen Dichte bezogen auf Luft 0,06925 ist, gleich 2 zu setzen. Ist also M das Molekulargewicht, d die Dampfdichte irgend eines Stoffs bezogen auf Luft, so ist

$$M : 2 = d : 0{,}06925, \text{ oder } M = \frac{2}{0{,}06925} d = 28{,}88\,d.$$

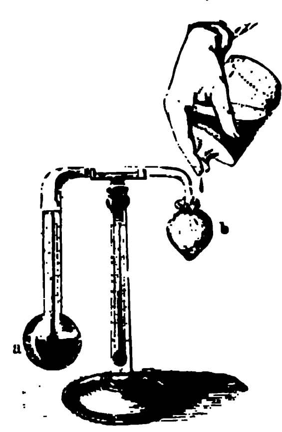
Um also das Molekulargewicht eines Stoffes zu erhalten, hat man nur seine Dampfdichte mit 28,88 zu multiplizieren.

604. Dampfdichtebestimmungsapparat von Viktor Meyer.

Verhalten des Wasserdampfs in der Atmosphäre. Infolge ihrer Berührung mit den Meeren und Flüssen enthält die atmosphärische Luft stets Wasserdampf, ist aber im allgemeinen nicht mit Wasserdampf gesättigt. Er ist farblos und für unser Auge nicht sichtbar und nicht zu verwechseln mit dem sogenannten Wasserdunst, welcher aus einzelnen, in der Luft schwebenden Tröpfchen besteht und sichtbare Nebel und Wolken bildet. Läßt man aus dem Ausströmungsrohr eines Dampfkessels Dampf entweichen, so nimmt unser Auge diesen erst in einem kurzen Abstande, etwa 1 cm weit von der Rohrmündung, als bereits verdichteten Wasserdampfstrahl wahr, unmittelbar an der Mündung zeigt sich ein klarer durchsichtiger Raum, welcher von dem eigentlichen, alsbald sich zu Wasser verdichtenden Wasserdampf ausgefüllt wird. Je wärmer die Luft ist, um so mehr Wasserdampf kann sie aufnehmen. Jeder Temperatur entspricht eine bestimmte Wasserdampfmenge, mit welcher die Luft gesättigt ist. Tritt dann mehr Wasserdampf hinzu, oder kühlt sich die gesättigte Luft ab, so verdichtet sich der Überschuß zu Nebel und Wolken. Bis zum Sättigungspunkte aber steht dem Verdampfungsbestreben des Wassers kein Widerstand entgegen. Ein trockener Wind, der aus den öden Landsteppen Asiens zu uns kommt,

entzieht begierig dem Boden und den Pflanzen die Feuchtigkeit, bringt daher in der Regel klare und trockene Witterung mit sich. Der heiße Süd- und Westwind dagegen, der sich über dem Mittel- und Atlantischen Meere mit Wasserdampf gesättigt hat, pflegt in unseren kühleren Regionen seinen Überschuß an Wasserdampf abzugeben und Regen herbeizuführen. Die Bestimmung des Wassergehaltes in der Luft ist daher eine der wichtigsten Aufgaben der Meteorologie; sie bildet den Gegenstand der

Hygrometrie. Drei Größen sind es, mit deren Bestimmung sich die Hygrometrie beschäftigt, und die wir von einander so unterscheiden: absolute Feuchtigkeit, relative Feuchtigkeit und Spannkraft des Wasserdampfes in der Luft. Unter absoluter Feuchtigkeit versteht man das Gewicht des in einem Kubikmeter Luft enthaltenen Wasserdampfes, ausgedrückt in Gramm. Wenn wir also sagen, die absolute Feuchtigkeit der uns umgebenden Luft ist 9, so heißt dies: in 1 cbm dieser Luft sind 9 g Wasserdampf enthalten. Unter relativer Feuchtigkeit versteht man das Verhältnis der in der Luft wirklich vorhandenen zu der bei der Sättigung vorhandenen Dampfmenge, also zu derjenigen Dampfmenge, welche im Maximum bei gleicher Temperatur in der Luft vorhanden sein könnte. Die relative Feuchtigkeit drückt sich also stets als ein echter Bruch, und indem man diesen Bruch mit 100 multipliziert, in Prozenten der absoluten Feuchtigkeit aus. Finden wir also nach Methoden, die wir sofort besprechen wollen, in der uns umgebenden Luft von der Temperatur 20° C. die absolute Feuchtigkeit 11,5, so ergibt sich mit Zuhilfenahme der Regnaultschen Spannkraftstabelle (vergl. S. 461), daß bei 20° C. in 1 cbm Luft im Maximum vorhanden sein könnten 17,2 g Wasserdampf; demnach wäre die relative Feuchtigkeit $\frac{11,5}{17,2}$ = 0,67 oder 67%. Spannkraft des Wasserdampfes in der Luft ist der Partialdruck e des Wasserdampfes in der Luft; er steht zur absoluten Feuchtigkeit in einem sehr einfachen Verhältnis. Es sind nämlich die absolute Feuchtigkeit und die Spannkraft des Wasserdampfes in der Luft im Zahlenwerte nahezu einander gleich, wenn man erstere in Gramm pro Kubikmeter und letztere in mm Quecksilber ausdrückt.

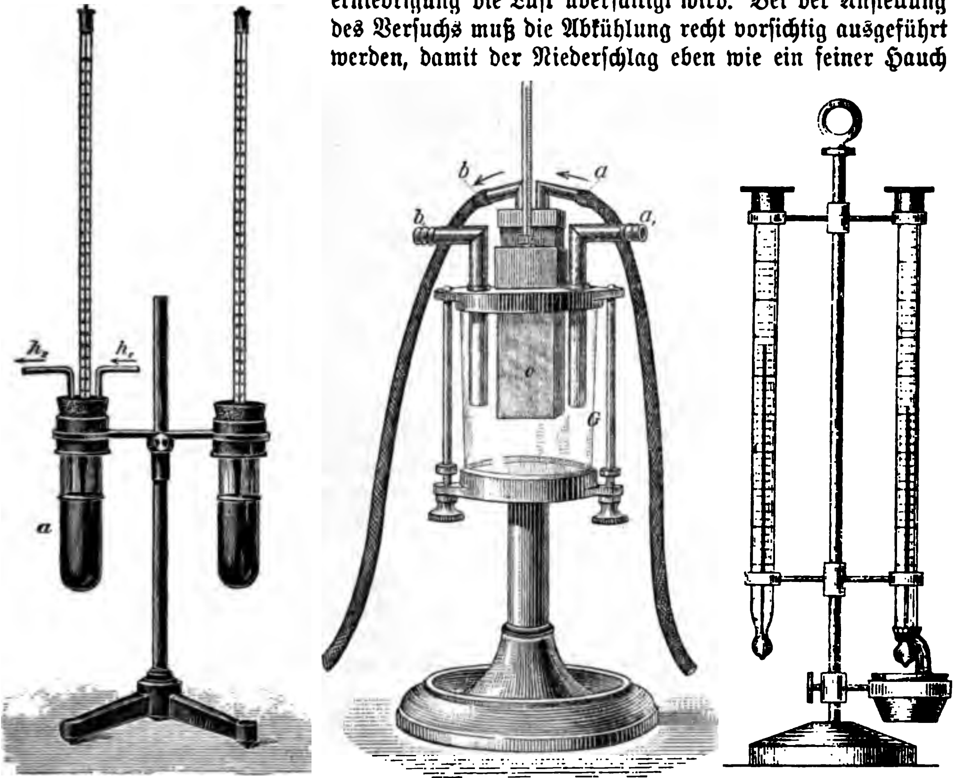


605. Daniells Hygrometer.

Feuchtigkeitsbestimmung. Direkt erhält man die absolute Feuchtigkeit, wenn man ein gemessenes Volumen Luft mittels eines Aspirators durch eine mit wasserabsorbierenden Medien (Chlorcalcium, Phosphorsäureanhydrid, Bimsstein und Schwefelsäure) gefüllte und vorher genau gewogene Trockenröhre saugt, und die durch die Absorption des Wassers bewirkte Gewichtszunahme bestimmt.

Methode der Taupunktsbestimmung. In den verschiedensten Formen wird das Daniellsche Hygrometer zur Feuchtigkeitsbestimmung angewandt. Der Originalapparat ist in Abb. 605 dargestellt. Zwei Glaskugeln a und b sind durch eine zweimal rechtwinkelig gebogene Röhre mit einander verbunden und eine derselben, a, ist nach Art des Kryophors (vgl. S. 459) zur Hälfte mit luftfreiem Schwefeläther gefüllt, so daß das Innere über dem Äther nur Ätherdampf enthält, sonst aber luftleer ist. In den Schwefeläther der Kugel a taucht das Gefäß eines feinen Quecksilberthermometers, während das Stativ ein zweites Thermometer zur Ablesung der Lufttemperatur trägt. Die Kugel a ist mit einem breiten, eingebrannten und glänzend polierten Goldreif versehen. Kühlt man nun die Kondensatorkugel b, welche mit Musselin umwickelt ist, durch Auftröpfeln von Äther, welcher sofort verdunstet, ab, so kondensiert sich der in b enthaltene Ätherdampf, infolgedessen entwickelt sich neuer Ätherdampf aus a, der sich wieder in b kondensiert u. s. f. Der Vorgang ist derselbe, wie wir ihn beim Kryophor besprochen. Die Kugel a und die sie umgebende Luft kühlen sich durch Verbrauch latenter Verdampfungswärme ab, bis der in der Luft enthaltene Wasserdampf sich nicht mehr als Dampf halten kann, sondern sich in tropfbarer Form auf a niederschlägt. Der Eintritt des Taubeschlags läßt sich bei vorsichtigem Abkühlen leicht beobachten. An dem im Äther befindlichen Thermometer

beobachtet man dabei den Taupunkt, d. h. diejenige Temperatur, bei welcher die Luft mit dem vorhandenen Wasserdampf gesättigt ist. Um ihn genau zu bestimmen, beobachtet man sowohl die dem Entstehen als auch die dem Verschwinden des Niederschlags entsprechende Temperatur und nimmt das Mittel aus beiden als Taupunktstemperatur an. Mit dieser geht man in die Regnaultsche Spannkraftstabelle ein, um aus ihr den zugehörigen Sättigungsdruck, resp. die absolute Feuchtigkeit f zu entnehmen. Das zweite Thermometer gibt die Lufttemperatur an. Geht man mit dieser in die Regnaultsche Tabelle ein, so erhält man die Wasserdampfmenge F, welche im Maximum in der Luft von der herrschenden Temperatur vorhanden sein könnte; das Verhältnis $\frac{f}{F}$ ist demnach die relative Feuchtigkeit. Ergibt sich dieses Verhältnis nahe gleich 1, so deutet dies an, daß man auf Regen rechnen kann, da bei geringer Temperaturerniedrigung die Luft übersättigt wird. Bei der Anstellung des Versuchs muß die Abkühlung recht vorsichtig ausgeführt werden, damit der Niederschlag eben wie ein feiner Hauch



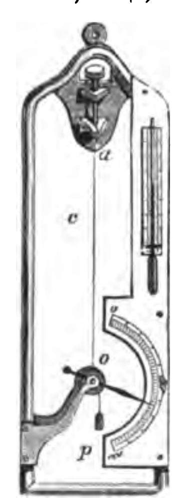
606. Regnaults Hygrometer. 607. Dufoursches Aspirationshygrometer. 608. Augustsches Psychrometer.

entsteht und vergeht; auch muß darauf geachtet werden, daß die Taufläche vor der vom Beobachter infolge des Atmens ausgehenden Feuchtigkeit möglichst geschützt werde. Abb. 606 zeigt ein Daniellsches Hygrometer in einer von Regnault modifizierten Form. Die beiden Thermometer befinden sich in hochpolierten, versilberten Gefäßen; die Abkühlung des Äthers im Taupunktsthermometergefäß a wird dadurch hervorgebracht, daß die Luft mittels eines Aspirators durch die Röhren h_1, h_2 hindurchgesaugt wird.

Abb. 607 stellt das Dufoursche Aspirationshygrometer dar. Es besteht aus zwei durch eine dünne Metallplatte von einander getrennten Metallgefäßen. Das hintere b ist bis etwa $^2/_3$ seiner Höhe mit Äther gefüllt, welcher wieder durch Aspiration zur Verdampfung, resp. Abkühlung gebracht wird. In das vordere, eventuell mit Quecksilber zu füllende Gefäß a, dessen Vorderseite vernickelt und hochpoliert ist, so daß sich der Eintritt des Beschlages mit großer Sicherheit beobachten läßt, befindet sich das Taupunktsthermo-

meter. Der ganze Apparat kann dicht in ein Glasgefäß eingesetzt werden, wofern man nicht bloß die Luftfeuchtigkeit, sondern die Feuchtigkeit eines durch die Röhren a_1, b_1 hindurchgeleiteten Gases bestimmen will.

Bequemer läßt sich die Feuchtigkeit der Luft mit dem Augustschen Psychrometer bestimmen (Abb. 608). Es besteht aus zwei gleichen, gut geteilten und genau untersuchten Thermometern, von denen das eine zur Bestimmung der Lufttemperatur dient, während das mit Zeug (Musselin) bewickelte Gefäß des anderen durch einen darum geschlungenen, in Wasser tauchenden Docht feucht erhalten wird. Ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt, so zeigen beide Thermometer dieselbe Temperatur an, da Wasser von der Oberfläche des feuchten Thermometers nicht weiter verdunsten kann. Ist dagegen die Luft, wie gewöhnlich, nicht mit Wasserdampf gesättigt, so wird Wasser am feuchten Thermometer verdunsten können, und dieses wird infolge des Verbrauchs latenter Verdampfungswärme niedriger stehen, als das trockene, und zwar um so tiefer, je trockener die Luft ist, je rascher also die Verdunstung vor sich gehen kann. Infolge der höheren Temperatur der Luft wird andererseits wieder dem feuchten Thermometer Wärme zugeführt; es wird daher schließlich ein thermischer Gleichgewichtszustand eintreten müssen, nämlich dann, wenn die durch die Verdunstung an die umgebende Luft abgegebene Wärmemenge gleich ist der von der wärmeren Umgebung dem feuchten Thermometer zugeführten. Die Spannkraft des Wasserdampfes in der Luft ist also kleiner als der der Temperatur des feuchten Thermometers entsprechende Sättigungsdruck. Aus der Differenz zwischen den Angaben der beiden Thermometer, der sogenannten psychrometrischen Differenz, läßt sich dann aus Tabellen, die nach teilweise empirischen, von August aufgestellten und von Regnault geprüften, Formeln berechnet sind, der Feuchtigkeitsgehalt der Luft ermitteln.



609. Saussuresches Haarhygrometer.

Haarhygrometer. Es gibt viele organische Körper, welche ihr Volumen oder ihre Form je nach dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft ändern. Haare, Fischbein, Federkiele, Holz, Stroh u. s. w. sind solche hygroskopische Körper, welche zu Feuchtigkeitsmessern mit empirisch zu graduierender Skale benutzt werden. Bei den sogenannten Wettermännchen, welche in Nürnberg zu Tausenden verfertigt werden, trägt eine im Innern eines kleinen Häuschens lotrecht ausgespannte, gedrehte Darmsaite eine horizontale Pappscheibe, auf welcher zwei Figuren, einen Herrn und eine Dame darstellend, angebracht sind. Dreht sich infolge größerer Feuchtigkeit die Darmsaite auf, so tritt der Herr mit einem Regenschirm aus seiner Thür; bei trockener Luft verkürzt sich die Saite, dreht sich also wieder zusammen, und die Scheibe läßt aus einer andern Thür die Dame mit einem Fächer hervortreten. Im ersteren Falle soll man auf regnerisches, im zweiten auf heiteres Wetter schließen können. Ähnliche Apparate sind in großer Menge unter verschiedenen Formen und aus dem verschiedensten Material hergestellt worden. Die Zuverlässigkeit ihrer Angaben läßt im allgemeinen manches zu wünschen übrig.

Recht brauchbare Resultate liefert dagegen das Saussuresche Haarhygrometer. Es besteht im wesentlichen aus einem durch Äther oder Lauge sorgfältig entfetteten Frauenhaar, dessen oberes Ende bei a und dessen unteres Ende an dem Umfange einer leicht beweglichen Rolle o befestigt und durch ein kleines Gewicht p so in konstanter Spannung gehalten wird. Der Wassergehalt des Haares in der Luft hängt von der relativen Feuchtigkeit ab; bei Wasseraufnahme verlängert, bei Wasserabgabe verkürzt es sich. Diese Längenänderungen werden im vergrößerten Maßstabe durch einen an der Rolle befestigten Zeiger an einer empirisch graduierten Skale abgelesen. Den Nullpunkt derselben bestimmt man, indem man das Instrument unter den Rezipienten einer Luftpumpe bringt, in welchem die Luft durch Chlorcalcium oder Schwefelsäure absolut trocken gemacht ist, den Punkt 100, indem man es in eine innen mit feuchtem Fließpapier bekleidete, in Wasser stehende und durch Wasser abgeschlossene Glasglocke setzt. Eine Anzahl dazwischen liegender Punkte wird durch Vergleichung mit anderen sicher funktionierenden Instrumenten markiert.

Bei dem Delucschen Hygrometer wird anstatt des Haares Fischbein benutzt.

Luftgewicht. Die drei meteorologischen Elemente: Barometerstand, Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt der Luft bestimmen das Luftgewicht. Ein Kubikzentimeter trockener, kohlensäurefreier, atmosphärischer Luft bei dem Normaldruck 760 mm und der Normaltemperatur 0° C. wiegt 1,293 mg. Mit steigendem Barometerstande nimmt das Luftgewicht zu; dagegen nimmt es ab, je wärmer und feuchter die Luft ist.

Meteorologie. Die Änderungen im Zustande unserer Atmosphäre sind zum großen Teile zurückzuführen auf Änderungen in den Wärmeverhältnissen, auf Ruhe oder Bewegung der Luft und ihrer Fähigkeit, Wasserdampf aufzunehmen oder Niederschläge zu bilden. Die Mannigfaltigkeit der Störungen des Gleichgewichts der Atmosphäre, welche die Wärme schon dadurch verursacht, daß sie die Expansivkraft der Luft erhöht und das Verdampfen des Wassers begünstigt, wird noch erhöht durch die Achsendrehung der Erde. Denn erstens treffen die von der Sonne der Erde zugesandten Wärmestrahlen immer andere Punkte der Erde und bedingen so eine Luftbewegung, und zweitens übt die vom Äquator nach den Polen zu abnehmende Drehungsgeschwindigkeit eine erhebliche Wirkung aus auf die ununterbrochenen Luftströmungen, welche infolge der ungleichen Erwärmung zwischen den Polen und dem Äquator stattfinden. Die periodisch wiederkehrenden Stellungsänderungen der Erde zur Sonne werden daher naturgemäß von gewissen Erscheinungen in der Atmosphäre begleitet sein, deren Eintreffen im allgemeinen mit einer großen Regelmäßigkeit stattfinden muß.



610. Anemometer der Witterungsbeobachtungsstätte auf dem Hohen Säntis.

Die verschiedenen Tages- und Jahreszeiten kehren mit ihren allgemeinen charakteristischen Wärmeverhältnissen immer wieder. Und für einen Planeten, der eine mathematisch vollkommene Kugelgestalt und ebenso eine streng symmetrische Anordnung in der Verteilung von Wasser und erdigem oder felsigem Lande besäße, für eine solche Erde würden die verschiedenen Zustände des Luftmeeres sich nach gewissen Zeitperioden in einer vollkommen regelmäßigen Reihenfolge wiederholen. Allein bei der wirklichen Beschaffenheit unseres Planeten liegen die Verhältnisse nicht so einfach. Die lokalen und temporären Umstände, welche auf die Wirkungsweise der Sonnenwärme Einfluß gewinnen, sind so wechselnder Art, daß sie eine fast unendliche Mannigfaltigkeit der Wetterverhältnisse bedingen.

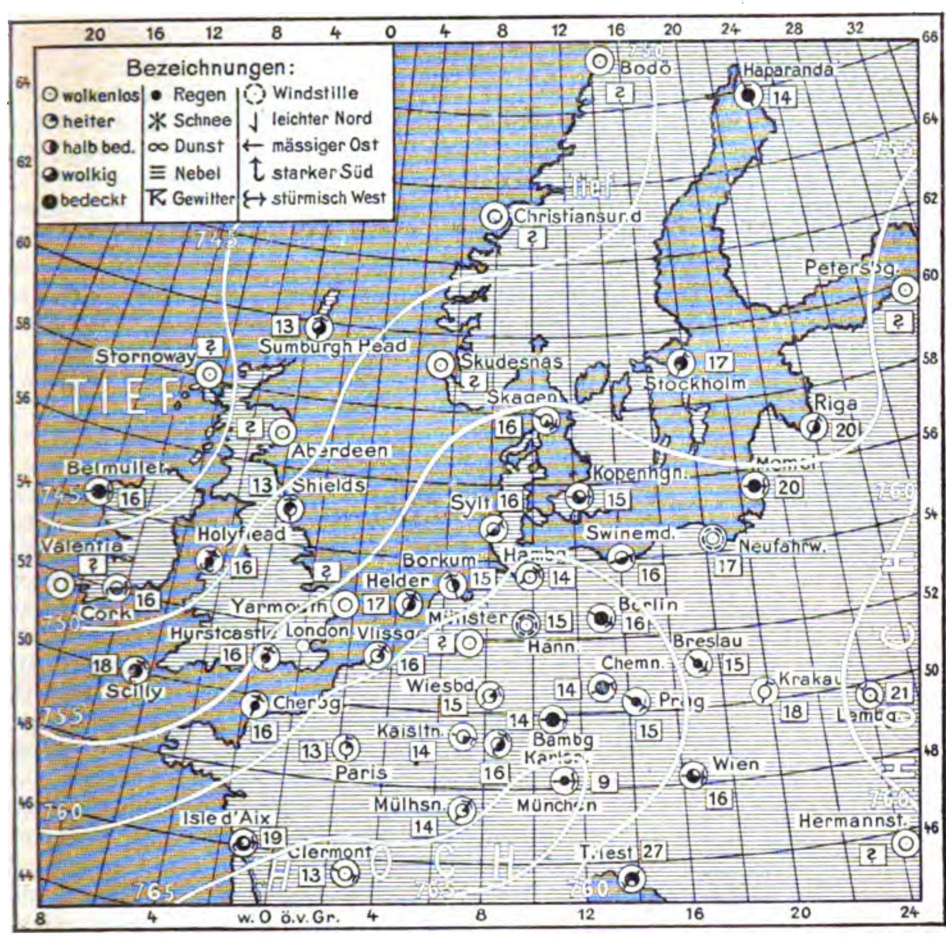
Wetter oder **Witterung** nennen wir die Gesamtheit der atmosphärischen Zustände, wie sie während eines kürzeren oder längeren Zeitraums für eine gewisse Gegend herrschen. Der besondere Zweig der physikalischen Wissenschaften, welcher sich mit der Erforschung der in der Atmosphäre vorgehenden Erscheinungen und Veränderungen beschäftigt, ist die **Meteorologie.**

Den Hauptinstrumenten für meteorologische Beobachtungen, dem Thermometer, Barometer, Psychrometer, schließen sich noch an die **Ombrometer** oder **Regenmesser**, welche dazu dienen, die in einer gewissen Zeit und auf einen abgegrenzten Raum gefallene Menge der Niederschläge zu bestimmen, **Windfahnen**, um die Windrichtung, **Anemometer**, um die Windstärke, **Elektroskope** und **Elektrometer**, um den elektrischen Zustand der Luft zu ermitteln, **Ozonometer**, um den Ozongehalt der Luft zu messen, und mehrere andere Instrumente.

Der Einfluß des Wetters auf das Wohlbefinden nicht nur des einzelnen Menschen, sondern auf die Zustände ganzer Länder und Völker ist hinlänglich bekannt. Die letzten Jahre erst haben gezeigt, wie schrecklicher Art die Verheerungen durch Überschwemmungen sein können. Aber abgesehen von derartigen Ereignissen sind es große Gebiete der menschlichen Beschäftigung, welche in den Erträgnissen, die sie gewähren, von der Gunst oder Ungunst der Witterung direkt abhängen, z. B. die Land- und Forstwirtschaft, Weinbau und Jagd, die Schifffahrt in erster Reihe, die Fischerei und eine ganze Reihe von Gewerben, die sich wie die Windmüllerei mit der Verarbeitung und Zubereitung von Rohprodukten befassen, auf deren Gewinnung jene ausgehen. — Landleute und Schiffer haben daher auch von jeher der Witterungskunde die größte Aufmerksamkeit geschenkt. Von ihnen stammen jene zahllosen Wetterregeln in Form kurzer Sinnsprüche, aus denen die ganze Meteorologie vor dem 19. Jahrhundert bestand. In der Regel fehlt aber diesen, im günstigsten Falle für lokale Verhältnisse mitunter gültigen, empirisch gewonnenen Erfahrungssätzen jede Rückbeziehung auf die letzte Ursache, welche gerade bei den atmosphärischen Vorgängen nur aus der Untersuchung der universellen Zustände erkannt werden kann.

In vielen Fällen sind die allbekannten Wetterregeln geradezu Unsinn, wie z. B. die Prophezeiungen des sogenannten hundertjährigen Kalenders, der in Wirklichkeit gar nicht existieren kann. Jedenfalls hat die Meteorologie, die Physik der Atmosphäre, damit nichts zu thun; für sie existieren die Erscheinungen nur als Wirkungen von Kräften, deren Natur, Wechselwirkung und Größe sie mittels geeigneter Methoden zu bestimmen sucht, um so ein vergleichbares Material zu gewinnen, nach welchem sich später eintretende Erscheinungen beurteilen lassen, so daß auf ihre wahrscheinliche Nachwirkung Schlüsse gemacht werden können. Freilich können wir, da diese Nachwirkungen, nämlich die Witterung, vom Zusammenwirken so unendlich vieler und verschiedener Faktoren abhängt, deren quantitative Feststellung in vollem Umfange geradezu unmöglich ist, immer nur von wahrscheinlichen Schlüssen reden, welche die Meteorologie in Bezug auf das Wetter machen kann. Immerhin ist der praktische Nutzen, welchen die Ausbildung der Meteorologie als Wissenschaft gewährt, ein ganz bedeutender. Wir brauchen nur darauf hinzuweisen, daß durch die Erforschung des Gesetzes der Winde, durch die Entdeckung, daß Stürme Wirbelbewegungen um einen fortschreitenden Mittelpunkt sind, dem Seefahrer die Möglichkeit gegeben ist, der gefahrdrohenden Region zu entfliehen, indem er möglichst entgegengesetzt der Bewegungsrichtung des Wirbels zu steuern sucht.

Um nun einen Überblick über die atmosphärischen Zustände, welche an verschiedenen Orten zu derselben Zeit herrschen, zu erlangen, hat man auf Alexander von Humboldts Anregung systematisch ein Netz von meteorologischen Stationen über die Erde ausgespannt, welches seine Maschen immer enger zieht, indem immer mehr solcher Beobachtungsstellen errichtet werden. An diesem Unternehmen haben sich alle Kulturstaaten beteiligt, und auf meteorologischen Kongressen, die von Zeit zu Zeit abgehalten werden, erledigt man diejenigen Fragen, welche sich auf die Beobachtungsmethoden und auf die Verwertung der durch sie erhaltenen Resultate beziehen. Für die Bezeichnung der meteorologischen Erscheinungen hat man eine besondere Chifferschrift eingeführt. Die wichtigsten der meteorologischen Stationen sind telegraphisch mit einer Zentralstelle verbunden, der sie ihre Beobachtungen sofort mitteilen, und von welcher sie unverzüglich verarbeitet und publiziert werden. Die Zentralstelle für alle meteorologischen Stationen Deutschlands bildet die deutsche Seewarte in Hamburg, welche die ihr von den Stationen zukommenden Beobachtungen systematisch behandelt und in täglichen „Wetterkarten" publiziert. Als Beispiel sei eine solche „Wetterkarte" (vom 20. August 1897) hier mitgeteilt (Abb. 611). Die weißen Zahlen auf schwarzem Grunde bedeuten den Barometerstand der einzelnen Stationen. Die eingeschriebenen weißen Linien (Isobaren) verbinden die Orte mit gleichem Barometerstand. „Hoch" und „Tief" zeigen barometrische Maxima und Minima an. Die schwarzen Zahlen drücken die Ortstemperaturen in ° C. aus. Die Zahl der Häkchen an den die Windrichtung angebenden Pfeilen bestimmt die Windstärke nach der Beaufortschen Skala. Außer den angeführten meteorologischen Bezeichnungen findet man bisweilen einige andere, weniger gebräuchliche angewandt, welche in Abb. 612 gegeben sind.



611. Wetterkarte vom 20. August 1897.

Es leuchtet ein, daß die Methoden, nach welchen die atmosphärischen Erscheinungen beobachtet werden, auf allen Stationen übereinstimmend sein müssen. Diese Übereinstimmung bezieht sich sowohl auf die Einrichtung der Instrumente, als auch auf die Tagesstunden, an welchen der Stand derselben registriert wird. Denn die Beobachtungen werden nicht ununterbrochen ausgeführt, sondern es genügt, Temperatur, Druck und Feuchtigkeitsgehalt zu bestimmten Tageszeiten zu beobachten, um aus ihnen einen Mittelwert abzuleiten. Durch Zusammenstellung der Ergebnisse der einzelnen Stationen erhält man ein annäherndes Gesamtbild des Wetters innerhalb des ganzen beobachteten Gebietes. Für gewisse Zwecke ist es nun aber doch wünschenswert, diese Zusammenstellung augenblicklich vornehmen zu können. Durch die Beobachtung zu gewissen Stunden erhält man freilich kein zusammenhängendes Bild von den Variationen der einzelnen meteorologischen Elemente, die den atmosphärischen Zustand bedingen. Deshalb läßt man den sich fast stetig ändernden Gang der Instrumente durch diese selbst aufzeichnen.

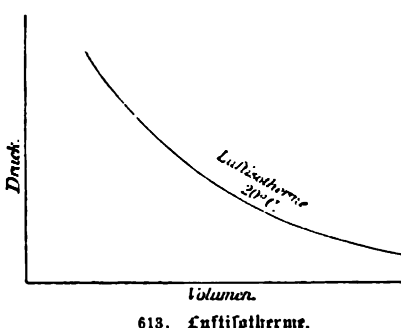
Blitz ohne Donner oder Wetterleuchten.
Hagel.
Graupeln.
Reif.
Tau.
Rauchfrost oder Duft.
Glatteis.
Schneegestöber.
Eisnadeln.
Starker Wind.
Sonnenring.
Sonnenhof.
Mondring.
Mondhof.
Regenbogen.
Nordlicht.

612. Meteorologische Zeichen.

Dies geschieht z. B. in der Art, daß ein durch das Instrument bewegter Stift seinen Stand auf einem Papierstreifen markiert, der durch ein Uhrwerk mit gleichmäßiger Geschwindigkeit vor dem Instrumente vorbeibewegt wird, oder daß das Instrument seinen Stand auf dem zu diesem Zwecke besonders präparierten Papiere ununterbrochen auf photographischem Wege fixiert.

Denken wir uns z. B. auf dem Quecksilbermeniskus im offenen Schenkel des Heberbarometers, der sich ebenso heben und senken kann wie der des längeren Schenkels, einen Kork mit Farbstift schwimmend, welcher auf einem vorüberziehenden Papierstreifen abfärben kann, so wird die Veränderung der Höhe der Quecksilbersäule sich in einer fortlaufenden Kurve ausdrücken, deren höchste Punkte den tiefsten Barometerständen entsprechen, und umgekehrt. Andererseits könnte man direkt hinter dem Spiegel der Quecksilbersäule ein photographisch präpariertes Papier vorbeipassieren lassen, welches so weit vom Licht geschwärzt wird, als dieses von dem Quecksilber in der Röhre nicht aufgehalten wird. Nach diesen und anderen Prinzipien sind Barographen, Thermographen u. s. w. konstruiert worden.

In sehr sinnreicher Weise hat der berühmte Astronom Pater Secchi in Rom einen Apparat zusammengestellt, welcher, durch ein Uhrwerk in Bewegung gesetzt, alle meteorologischen Elemente in der beschriebenen Art als Kurven verzeichnet. Dieser selbstthätige Meteorograph erregte auf der Pariser Ausstellung im Jahre 1866 allgemeine Bewunderung und ist seitdem auf vielen Sternwarten als ein nie rastender Arbeiter angestellt worden. Auf der einen Seite des Secchischen Apparats sah man außer dem Uhrwerk die photographischen Tableaux der Barometerstände, der Angaben des trockenen und des feuchten Thermometers und derjenigen Stunden, in welchen Regen gefallen war, sowie die Regenmenge. Die andere Seite enthielt die Angaben der Windstärke, der Windrichtung, eines zweiten Thermometers, um die Wärme der Sonnenstrahlen zu messen, und eine Kontrolle der Barometerstände und der Regenmengen. Die Tableaux der ersten Seite liefen in 2½ Tagen, die der zweiten in 10 Tagen ab. So oft also mußten sie erneuert werden. Während dieser Zeit wurde ein vollständiges Bild der atmosphärischen Vorgänge entworfen durch ein scharfsinnig erfundenes Uhrwerk durch das Ineinandergreifen zahlreicher und mit aller mechanischen Vollkommenheit ausgeführter Hebelkombinationen und durch elektromagnetische Kraftäußerung einer galvanischen Batterie, mittels welcher auf telegraphischem Wege diejenigen Teile in Wirksamkeit gesetzt wurden, welche außerhalb des Beobachtungsraumes lagen. — In neuerer Zeit ist ein interessanter Meteorograph von Prof. v. Rysselberghe in Ostende konstruiert worden.



613. Luftisotherme.

Verflüssigung der Gase. Kritische Temperatur und kritischer Druck. Wir haben früher den Unterschied zwischen einem Gase und einem gesättigten Dampfe dahin formuliert, daß wir sagten, das Gas folge dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetze, während der gesättigte Dampf ein Maximum der Spannkraft bei gegebener Temperatur besitze. Dieser Unterschied ist aber kein charakteristischer, sondern nur ein gradueller. Denken wir uns ein Kilogramm Luft bei mittlerer konstanter Temperatur, dann ist die Beziehung zwischen seinem Druck p und seinem Volumen v nach dem Mariotteschen Gesetze durch die Gleichung gegeben $p \cdot v =$ konstant.

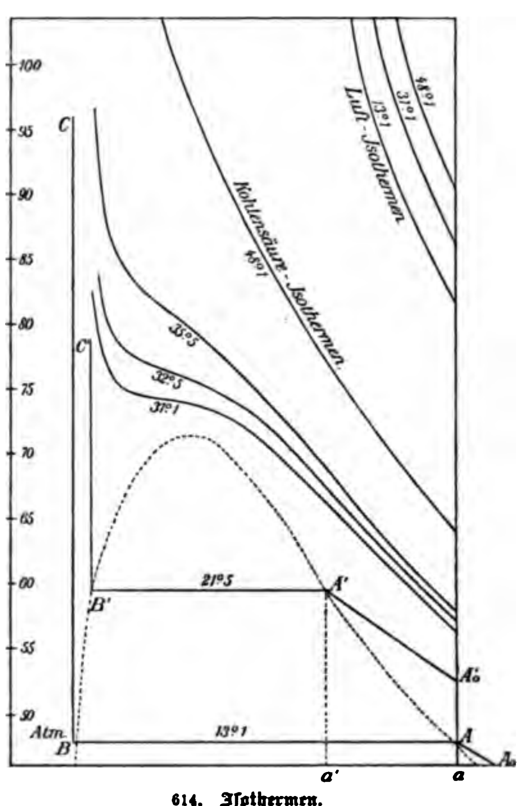
Stellen wir diese Gleichung graphisch in rechtwinkeligen Koordinaten (Abb. 613) dar, und zwar die Volumina als Abscissen, die Drucke als Ordinaten, so erhalten wir eine Kurve, welche, wie in der Mathematik gelehrt wird, eine Hyperbel ist. Wir nennen sie in unserem Falle Isotherme*) und verstehen darunter allgemein eine Kurve, welche die Zustandsänderung eines Gases bei konstanter Temperatur darstellt.

Nehmen wir anstatt der Luft ein Kilogramm Kohlensäure im gasförmigen Zustand, etwa bei der konstanten Temperatur 50° C., so gilt auch hier dieselbe Beziehung zwischen

*) In der Klimatologie versteht man unter Isotherme eine Linie, welche Orte gleicher Temperatur mit einander verbindet.

Druck und Volumen, und wir erhalten als Isotherme wieder eine Hyperbel; dasselbe findet bei Kohlensäure statt für eine Temperatur von 40° C. Anders verhält es sich aber für eine Temperatur, bei welcher eine Kondensation der Kohlensäure eintreten kann, z. B. für eine Temperatur von 21,5° C. Verkleinern wir, während diese Temperatur konstant erhalten wird, das Volumen der Kohlensäure durch Erhöhung des Druckes, dann kommen wir zu einem Punkte, wo der erste Tropfen flüssiger Kohlensäure sich zeigt; wir haben alsdann gesättigten Dampf, dessen Druck bei weiterer Volumenverminderung nicht mehr erhöht werden kann, sondern konstant bleibt, bis alle Kohlensäure flüssig geworden ist. Von diesem Momente ab wird der Druck, da die flüssige Kohlensäure nur wenig zusammendrückbar ist, wieder schnell ansteigen.

Wir können also drei Teile bei der Isotherme (21,5° C.) A_0' A' B' C' unterscheiden: der Teil A_0' A' stellt den Verlauf während der Zusammendrückung bis zum Sättigungsdruck a' A' des Dampfes dar; der Teil A' B' den Verlauf während der Verflüssigung, in welchem also die Kohlensäure sich zum Teil in flüssigem, zum Teil in dampfförmigem Zustande befindet, der Teil B' C' endlich den Verlauf, wenn alle Kohlensäure flüssig geworden ist. Ähnlich ist der Verlauf der Isothermen der Kohlensäure für tiefere Temperaturen, z. B. 13,1°, und auch für höhere, aber nur bis zu einer gewissen Temperatur, für welche der mittlere Teil (A' B') der Kondensation fortfällt und eine Verflüssigung bei keinem noch so bedeutenden Drucke mehr möglich ist. Diese Temperatur, bei welcher also der Unterschied zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand verschwindet, oberhalb deren ein Gas in den tropfbaren Aggregatzustand nicht übergeführt werden kann, heißt die **kritische Temperatur**, der entsprechende Druck der **kritische Druck**, der Zustand, in welchem sich das Gas bei der kritischen Temperatur und dem kritischen Druck befindet, der **kritische Zustand**, oder auch der **Cagniard de la Toursche Zustand**, weil Cagniard de la Tour ihn und die kritischen Daten zuerst beobachtet hat. Der Verlauf der Isothermen für Kohlensäure ist zuerst von **Andrews** auf Grund der von ihm mit Kohlensäure angestellten Versuche gegeben worden. In Abb. 614 entspricht die Abscissenachse nicht dem Drucke Null, sondern einem Drucke von 47 Atmosphären.



614. Isothermen.

Erwärmt man eine mit flüssiger Kohlensäure etwa bis zur Hälfte gefüllte, zugeschmolzene Glasröhre, aus welcher alle Luft entfernt ist, so daß der Raum über der flüssigen Kohlensäure nur gesättigten Dampf derselben enthält, so dehnt sich die Flüssigkeit sehr stark aus, und um so stärker, je näher man der kritischen Temperatur kommt; der ursprünglich konkave Meniskus verflacht sich allmählich immer mehr, und ist die kritische Temperatur, welche für Kohlensäure bei + 32° C. liegt, erreicht, so verschwindet die Grenze, und die Substanz erfüllt die Glasröhre als homogene Masse. Der Vorgang der Verflüssigung der Gase und der Cagniard de la Toursche Versuch kann bequem und leicht mittels des **Cailletetschen** Apparats (Abb. 615) demonstriert werden. Man leitet durch die gut getrocknete Glasröhre a, in deren unterem Teile sich etwas Quecksilber befindet, hinreichend lange Zeit trockene gasförmige Kohlensäure mit geringem Überdruck, schmilzt dann die Röhre oben

zu, schließt sie am unteren Ende unter und durch Quecksilber ab und bringt sie in das mit Quecksilber gefüllte, schmiedeeiserne Gefäß G, welches einerseits durch die Überwurfsschraube V absolut dicht verschlossen, andererseits durch das schlangenförmige Kupferrohr K mit der hydraulischen Presse P verbunden werden kann. Mittels derselben kann auf das in G befindliche Quecksilber und durch dieses auf die in der Glasröhre befindliche Kohlensäure ein Druck bis zu 300 Atmosphären ausgeübt werden. Man kann auf diese Weise die allmähliche Verflüssigung der Kohlensäure und auch den kritischen Zustand derselben beobachten, wenn man in den Glasmantel b Wasser von etwa + 35° gießt.

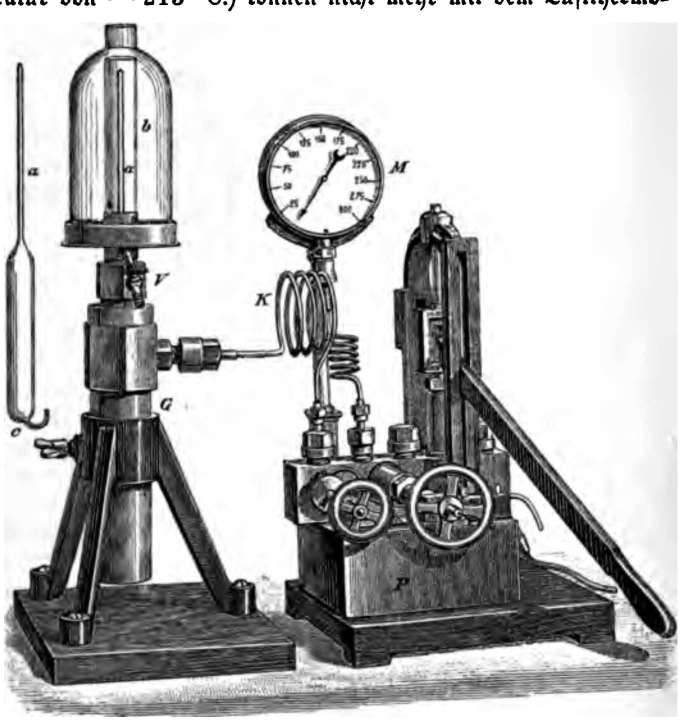
Folgendes sind die

Kritischen Daten einiger Substanzen:

	Kritische Temp.	Kritischer Druck
Wasser	365° C.	196 Atmosphären
Schwefelkohlenstoff	275° „	76 „
Schweflige Säure	157° „	80 „
Ammoniak	130° „	140 „
Kohlensäure	32° „	75 „
Äthylen	9,2° „	58 „
Sauerstoff	—118° „	48 „
Kohlenoxyd	—140° „	36 „
Stickstoff	—145° „	42 „
Wasserstoff	—174° „	99 „

Ältere Versuche über die Verflüssigung von Gasen. Verflüssigung von Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd. Das Chlor ist bereits im Jahre 1805 von Northmore flüssig dargestellt worden. Faraday gelang es in den zwanziger Jahren, durch verstärkten Druck mittels einer Kompressionspumpe Chlorgas, schweflige Säure, Schwefelwasserstoffgas, Cyan, Kohlensäure und Stickstoffoxydul und durch gleichzeitige Anwendung von tiefen Temperaturen und hohem Druck noch viele andere, früher nur als Gase bekannte Körper in flüssigem, einige sogar in festem Zustande darzustellen. Wichtig wurde die Darstellung fester Kohlensäure (1834) durch Thilorier, weil man mit ihrer Hilfe sehr tiefe Temperaturen herstellen konnte, und als Natterer die nach ihm benannten Apparate (1844) konstruiert hatte, welche ein gefahrloseres Experimentieren mit hohen Drucken ermöglichten, suchte man die permanenten Gase durch möglichst hohen Druck flüssig zu erhalten; indessen blieben die Versuche, selbst bei Anwendung von Drucken bis zu 3000 Atmosphären, ohne Erfolg. Erst als Andrews durch seine schönen und wichtigen Untersuchungen, welche erst ein klares Verständnis über die Verhältnisse des flüssigen und gasförmigen Zustandes der Materie verbreiteten, gezeigt hatte, daß man, um einen Erfolg zu erzielen, notwendigerweise mit der Abkühlung unter die kritische Temperatur herabgehen müsse, gelang es gleichzeitig (1877) Cailletet in Paris und Raoul Pictet (damals in Genf, jetzt in Berlin) und später den Physikern Wroblewski und Olszewski in Krakau, alle permanenten Gase flüssig darzustellen. Cailletets Methode bestand darin, daß er stark (bis zu 300 Atmosphären) komprimierten Sauerstoff sich plötzlich ausdehnen ließ. Die hierdurch eintretende bedeutende Abkühlung bewirkte, daß das Gas sich in Gestalt eines Nebels niederschlug, welcher als flüssig gewordener Sauerstoff erkannt wurde. In derselben Weise verflüssigte er Stickstoff, Wasserstoff und atmosphärische Luft. Raoul Pictet verfuhr nach einer anderen Methode. Flüssige schweflige Säure wurde mittels einer Pumpe durch einen Kreislauf von Röhren getrieben, in welchen sie abwechselnd verdampft und wieder verdichtet wurde. Auf diese Weise erzielte er durch die Verdunstung eine Temperatur von — 65° C., die er zur Abkühlung eines Gefäßes benutzte, in welchem Kohlensäure bei geringem Drucke (4—6 Atmosphären) verflüssigt wurde. Durch Verdunstung der flüssigen Kohlensäure erhielt er eine Temperatur von — 130° C., und diese benutzte er wieder, um eine starke, 5 m lange Röhre abzukühlen, die mit dem eigentlichen Gasbehälter verbunden wurde, in welchem durch Erhitzen von chlorsaurem Kali der Sauerstoff (oder aus einem Gemisch von ameisensaurem Kali mit kaustischem Natron der Wasserstoff) entwickelt wurde. Der Druck des Sauerstoffs stieg während des Funktionierens bis auf 520 Atmosphären, sank dann aber bald auf 320. Bei Öffnung des Schraubenhahns, welcher Kommunikation zwischen dem Behälter und der langen

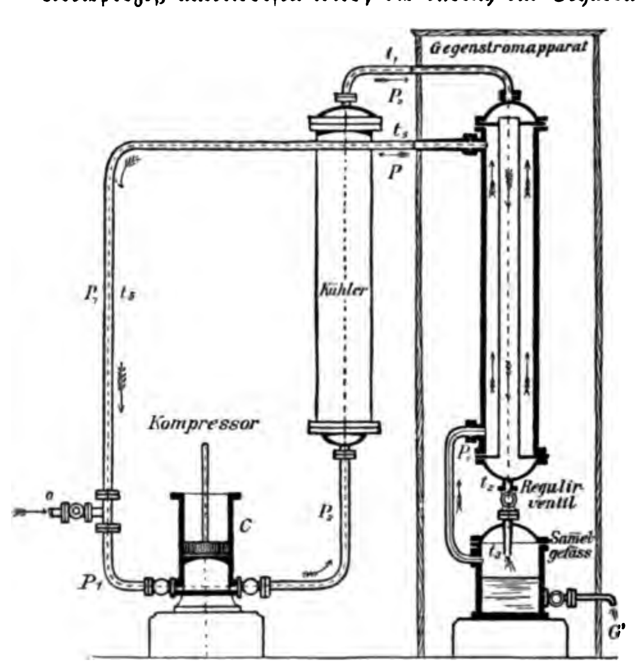
abgekühlten Röhre herstellt, entweicht der Sauerstoff mit großer Heftigkeit, zum Teil in Form eines flüssigen Strahls in diese Kompressionsröhre und wird in ihr durch seinen eigenen Druck verflüssigt. Raoul Pictet hat große derartige Verflüssigungsanlagen, die mit mehrfachen Kreisprozessen arbeiten, ausgeführt und eine solche auf der letzten Genfer Landesausstellung in voller Thätigkeit vorgeführt. In der ersten Maschine wurde mittels der sogenannten Pictetschen Flüssigkeit, einem Gemisch von Kohlensäure und schwefliger Säure eine Temperatur von — 100° bis — 110° erzielt, welche benutzt wurde, um in einer zweiten Maschine Stickstoffoxydul zu verflüssigen und dadurch eine Temperatur von — 160° zu erhalten. In dem dritten Apparat wurden endlich Sauerstoff und atmosphärische Luft hauptsächlich durch eigenen Druck in den flüssigen Zustand übergeführt. Die hierbei auftretenden niedrigen Temperaturen (Wroblewski und Olszewski erreichten mit flüssigem Stickstoff die niedrigste Temperatur von — 213° C.) können nicht mehr mit dem Luftthermometer gemessen werden; man bedient sich hierzu der Thermoelemente, die in der Elektrizität ihre Besprechung finden werden.



615. Cailletets Apparat zur Verflüssigung der Gase.

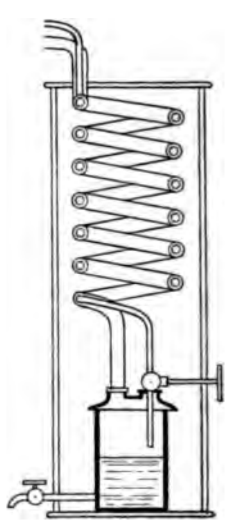
Das Lindesche Verfahren zur Herstellung flüssiger Luft. In der neuesten Zeit ist es Professor Linde in München durch Einführung eines neuen Prinzips gelungen, niedrige Temperaturen und damit auch die Verflüssigung beliebiger Luftmengen mit so einfachen und dabei doch so wirksamen Mitteln und mit verhältnismäßig so geringem Aufwande zu erzielen, daß nicht bloß Laboratorien, sondern auch Werkstätten der Industrie davon leicht und bequem Gebrauch machen können, während die bisher von den Physikern angewandten Methoden und Hilfsmittel so schwierig in der Handhabung und so kostspielig waren, daß nur wenige Laboratorien der Welt die Einrichtungen besaßen, um für Versuchszwecke geringe Mengen flüssiger Luft herzustellen. Die Grundlage, auf der das Lindesche Verfahren beruht, bildet die wichtige, aber zu wenig beachtete Thatsache, daß, wenn ein Gas unter Druck durch ein Ventil ausströmt, es zur Leistung innerer Arbeit Wärme verbraucht und sich also abkühlt. Diese Abkühlung, welche von Thomson und Joule berechnet und experimentell bestimmt ist, ist zwar unter gewöhnlichen Verhältnissen nur gering, Linde verwertet sie aber von drei Gesichtspunkten aus: 1) macht er den Druckunterschied, unter welchem die Ausströmung erfolgt, sehr groß und steigert damit die ursprüngliche Abkühlung; 2) schränkt er den hierfür erforderlichen Arbeitsaufwand ein auf Grund der Erwägung, daß er nicht von der Druckdifferenz, sondern von deren Verhältnis abhängt, und 3) führt er das in einem einzigen kontinuierlichen Kreisprozeß bestehende Gegenstromprinzip ein, in dem die ausgeströmte Luft zur Abkühlung der noch nicht ausgeströmten verwandt und so eine selbstthätige Steigerung der Abkühlung erzielt wird.

Abb. 616 stellt den Lindeschen Apparat schematisch da. **Durch den Flansch** a wird von dem **Kompressor** (Verdichter) C atmosphärische Luft vom Drucke P_1 angesaugt und bis auf den Druck P_2 (etwa 175 Atmosphären) komprimiert, wobei sie sich erwärmt. Sie wird dann unter Beibehaltung des Druckes P_2 durch den **Kühler auf die Temperatur** t_1 des Kühlwassers abgekühlt und in das Mittelrohr des **Gegenstromapparats** zum Regulierventil geleitet. Hier dehnt sich die hochgespannte Luft aus und erfährt die oben erwähnte, von der Druckverminderung abhängige Abkühlung. Diese auf die Temperatur t_3 abgekühlte Luft vom Drucke P_1 wird dann wieder in Richtung der Pfeile im äußeren Rohre des Gegenstromapparates nach aufwärts (— wodurch das die innere Röhre durchströmende Gas vorgekühlt wird —) und zur Eintrittsstelle zurückgeführt, wo sie infolge der Wärmeabgabe mit der niedrigeren Temperatur t_4 (t_5) ankommt, vom Kompressor wieder angesogen und auf diese Weise längere Zeit hindurch kontinuierlich dem eben beschriebenen Kreisprozeß unterworfen wird, bis endlich ein Beharrungszustand eintritt und damit die Verflüssigung beginnt. Die flüssige Luft wird in einem Sammelgefäß aufgefangen und kann von hier aus mittels des Hahnes G′ verzapft werden. Der eigentliche Gegenstromapparat (Abb. 617), der in unserer **Abbildung** nur schematisch skizziert ist, besteht aus zwei etwa 40 m langen Kupferspiralen von 3 resp. 6 cm innerem Durchmesser, von denen eine die andere umschließt. Sie sind derart mit einander verbunden, daß die Luft nach ihrem Durchgange durch die innere Spirale und durch das Drosselventil die äußere durchströmt. Der in der inneren Spirale herabsinkende Luftstrom wird durch den in der äußeren Spirale aufsteigenden, kälteren fortwährend abgekühlt, bis die kritische Temperatur (— 141° C.) erreicht ist. Prof. Linde hat eine Verflüssigungsanlage zuerst in München, dann auf der Bayrischen Landesausstellung in Nürnberg 1896 und im Januar 1897 in Berlin vorgeführt. Bei seinen Versuchen betrug der Druck P_1 etwa 22, P_2 etwa 65 Atmosphären, die tiefste Temperatur etwa — 163° C. Es konnten mittels des von **Brotherhood** in London verfertigten, dreistufigen Kompressors pro Stunde etwa 20 cbm Luft auf 175 Atmosphären komprimiert und stündlich mehrere Liter flüssiger Luft erhalten werden. Als Sammelgefäße für die flüssige Luft werden die sogenannten **Dewarschen** doppelwandigen Glasflaschen verwendet, bei welchen der Zwischenraum zwischen den beiden Wänden evakuiert ist und daher einen vorzüglichen Schutz gegen die von außen eindringende Wärme gewährt, so daß in solchen Flaschen die flüssige Luft, welche bei Atmosphärendruck eine Temperatur von — 190° zeigt, ohne besonderen Verschluß stundenlang aufbewahrt werden kann. Die flüssige Luft ist eine vollkommen klare Flüssigkeit mit zartblauer Färbung, die um so stärker hervortritt, je weniger Stickstoff die Flüssigkeit enthält. Die anfänglich aufgefangene flüssige Luft zeigt ein getrübtes, milchiges Aussehen, welches indessen eine Folge beigemischter fester Kohlensäure ist. Filtriert man sie mittels eines Papierfilters, so bleibt die feste Kohlensäure auf dem Filter zurück, und man erhält eine klare Flüssigkeit. Quecksilber mit flüssiger Luft übergossen erstarrt sofort zu



616. Lindes Apparat zur Darstellung flüssiger Luft.

einem bleiähnlichen Klumpen, der sich hämmern und schneiden läßt; auch Alkohol und Äther können durch Übergießen von Luft leicht zum Erstarren gebracht werden. Merkwürdig ist der Einfluß, welchen flüssige Luft infolge ihrer kolossalen Kälte auf die Elastizität gewisser Körper ausübt. Taucht man einen Gummischlauch in flüssige Luft, so wird er glashart, so daß er, mit einem Hammer geschlagen, wie Glas zersplittert. Es soll nicht unerwähnt bleiben, daß die flüssige Luft, was den Gehalt an Sauerstoff und Stickstoff betrifft, durchaus nicht die Zusammensetzung der atmosphärischen Luft hat. Während letztere bekanntlich etwa $^4/_5$ Stickstoff und nur $^1/_5$ Sauerstoff enthält, ist die flüssige Luft bedeutend sauerstoffreicher; denn sie besteht aus etwa 2 Teilen Sauerstoff auf 1 Teil Stickstoff; außerdem verdampft der Stickstoff rascher als der Sauerstoff, so daß die flüssige Luft bei offenem Stehen immer sauerstoffreicher wird. Dies läßt sich schön zeigen, wenn man einen glimmenden Holzspan in die Flüssigkeit, welche längere Zeit an der Luft gestanden, taucht; der glimmende Span entflammt und brennt in der Flüssigkeit mit leuchtender Flamme weiter. Gerade dieser Umstand, daß die Verflüssigung der Luft unter einer unmittelbaren, partiellen Trennung ihrer Bestandteile vor sich geht, daß sauerstoff- und stickstoffreiche Gemische mit geringem Aufwande hergestellt, und daß der Apparat mit geringen Modifikationen zur fabrikmäßigen Erzeugung von Sauerstoff direkt aus der Luft angewandt werden kann, wird voraussichtlich der Anwendung des Lindeschen Verfahrens, besonders in der chemischen Industrie, neue Bahnen eröffnen.



617. Gegenstromapparat.

Fortpflanzung der Wärme. Die Fortpflanzung der Wärme kann auf zwei Arten erfolgen, entweder durch **Leitung** oder durch **Strahlung**. Bei der Wärmeleitung pflanzt sich die Wärme in einem Körper oder von einem Körper zum anderen von Schicht zu Schicht und zwar stets von Stellen höherer zu Stellen tieferer Temperatur fort. Bei der Strahlung wird die Wärme in eine andere Energieform umgesetzt, welche nachher sich wieder in Wärme verwandelt. Die Fähigkeit, die Wärme fortzuleiten, ist für verschiedene Körper verschieden. Dies kann mittels des **Ingenhoußschen** Apparats leicht nachgewiesen werden (Abb. 618). Durch die eine Seitenwand eines Wasserbehälters geht eine Anzahl Stopfbuchsen mit gleich langen und gleich starken Stäben aus verschiedenen Materialien, welche mit Wachs oder Stearin überzogen sind und in möglichst gleichen Abständen kleine, gleich schwere Kügelchen tragen. Wird nun das Wasser im Behälter erwärmt, so fallen die Kügelchen der Reihe nach von den einzelnen Stäben, von der Erwärmungsstelle aus gerechnet, schneller oder langsamer ab, je nachdem der betreffende Stab ein **guter** oder **schlechter Wärmeleiter** ist. Genaue Untersuchungen, welche von **Franz** und **Wiedemann** über das Leitungsvermögen angestellt worden sind, haben ergeben, daß interessante Beziehungen zwischen den Leitungsfähigkeiten der Körper für Wärme und für Elektrizität bestehen, und zwar daß gute Wärmeleiter auch zugleich gute Elektrizitätsleiter sind. Setzt man die Leitungsfähigkeit des Silbers gleich 100, so ergeben die Versuche für die anderen Körper folgende relativen Werte: für Kupfer je nach der Reinheit desselben 90—50, für Zink 30, für Eisen 18—15, für Platin 10, für Glas 0,2.



618. Ingenhoußscher Apparat.

Die Wärmeleitungsfähigkeit der Krystalle ist nach verschiedenen Richtungen verschieden in einem und demselben Krystalle. Berührt man z. B. eine mit einer feinen Wachsschicht überzogene Bergkrystallplatte mit einer glühenden Nähnadelspitze, so entsteht an der Berührungsstelle durch das Schmelzen und Verdampfen des Wachses nicht ein Kreis, wie es bei Glas der Fall ist, sondern eine Ellipse. Diese Thatsache läßt auch auf einen innigen Zusammenhang zwischen Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes und Wärmeleitungsvermögen schließen.

Was die Wärmeleitungsfähigkeit in Flüssigkeiten anbelangt, so muß man bei ihnen Strömung von Leitung zu trennen wissen. Beim Erwärmen einer Flüssigkeit von unten findet nicht Leitung, sondern Strömung (Konvektion) der erwärmten, leichteren Flüssigkeit nach oben und Sinken der kalten, schwereren Flüssigkeit nach unten statt. Nur beim Erwärmen von oben kann man die Wärmeleitung bei Flüssigkeiten mittels Thermometer beobachten, welche vertikal übereinander in die Seitenwand des mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllten Gefäßes eingesetzt sind. Auf diese Weise findet man, daß Flüssigkeiten schlechte Wärmeleiter sind.

Noch schlechter als Flüssigkeiten leiten Gase die Wärme. Man untersucht ihr Wärmeleitungsvermögen in ähnlichen Gefäßen wie das von Flüssigkeiten, indem man zur Vermeidung von Strömungen die Gefäße mit Daunen füllt. Nach Magnus leitet von den Gasen Wasserstoff am besten, und zwar etwa siebenmal besser als Luft.

Zweitens kann Wärme von einem Körper durch Strahlung auf einen anderen fortgepflanzt werden, d. h. sie kann an der Oberfläche des strahlenden Körpers in Ätherwellenenergie verwandelt und von den Körpern, welche sie auf ihrem Wege trifft, ganz oder teilweise aufgenommen und wieder in Wärme umgesetzt werden.

Die aus der Undulationstheorie gefolgerte Identität der strahlenden Wärme und des Lichtes ist, seitdem von Melloni die Existenz der strahlenden Wärme nachgewiesen war, in rascher Aufeinanderfolge für die Reflexion, Brechung, Dispersion und Polarisation experimentell bestätigt worden. Eine in den Brennpunkt eines von zwei sich gegenüberstehenden, parabolischen Spiegeln gebrachte glühende Kohle entzündet Schießbaumwolle oder ein Streichholz, welche sich im Brennpunkte des zweiten befinden.

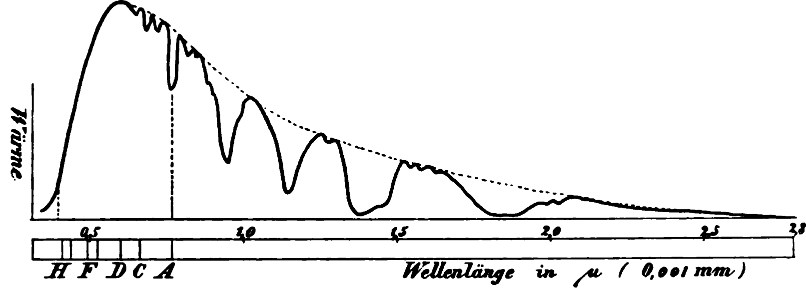
Untersucht man die durch ein Prisma zerlegten Lichtstrahlen auf ihre Wärmeenergie, so findet man, daß mit zunehmender Brechbarkeit die Wärmeenergie abnimmt, daß also die Wärmestrahlen vorzugsweise die roten und ultraroten und die für das Auge nicht mehr sichtbaren Strahlen des Spektrums sind. Da Glas ein zu großes Absorptionsvermögen für Wärmestrahlen besitzt, muß man für solche Versuche Prismen und Linsen von Steinsalz anwenden, welches die Wärmestrahlen fast vollständig durchläßt. Ebenso wie die verschiedenen Körper einen verschiedenen Grad von Durchlässigkeit für Lichtstrahlen zeigen, besitzen sie auch einen verschiedenen Grad von Diathermansie oder Wärmedurchlässigkeit. Metalle sind für Wärmestrahlen ebenso adiatherman, wie undurchlässig für Lichtstrahlen. Steinsalz verhält sich gegen Wärmestrahlen, wie ein durchsichtiger, farbloser Körper gegen Lichtstrahlen. Alaun und Wasser sind durchlässig für Lichtstrahlen, absorbieren aber fast vollständig die Wärmestrahlen. Eine konzentrierte Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff ist vollkommen undurchsichtig, läßt aber die Wärmestrahlen sehr gut durch. Das Strahlungsvermögen ist bei gegebener Temperatur außerordentlich verschieden, wie die Versuche mit dem Leslieschen Würfel zeigen. Dies ist ein Metallwürfel, dessen eine Seite hochpoliert, die zweite rauh, die dritte weiß angestrichen und die vierte schwarz berußt ist. Bei gleicher Temperatur strahlt die schwarze Seite mehr Wärme aus, als die rauhe, diese mehr, als die weiße und am wenigsten die polierte. Ebenso wie für Lichtstrahlen ist auch das Verhältnis der Emission und Absorption von Wärmestrahlen konstant.

Zur Messung der Wärmestrahlung dienen zwei Meßapparate, welche erst in dem Abschnitt über Elektrizität ihre Beschreibung finden, der Thermomultiplikator und das Bolometer.

Mit Hilfe des letzteren, bei welchem die durch Strahlung bewirkte Temperaturerhöhung eines dünnen, geschwärzten Metalldrahtes aus der Zunahme seines galvanischen Leitungswiderstandes bestimmt wird, hat Langley die Verteilung der Wärmeenergie im

Sonnenspektrum genau untersucht. Er fand, daß das Wärmespektrum sich weit über die Grenzen des sichtbaren Spektrums erstreckt, daß Wärmewirkungen im Ultraviolett bis zu Strahlen von der Wellenlänge 0,3 μ (Mikron) und im Ultrarot bis zu Strahlen von etwa der Wellenlänge 3 μ nachweisbar sind, und daß das Wärmemaximum im Gelb in der Nähe der Fraunhoferschen Linie D liegt. Abb. 619 stellt das Sonnenwärmespektrum nach Langley dar. Man erkennt, daß die Ausdehnung des unsichtbaren Wärmespektrums über die Fraunhofersche Linie A hinaus etwa sechsmal so groß ist, als das ganze sichtbare Spektrum von H bis A. Auch die Wärmespektra des Mondes und anderer leuchtender sowohl wie dunkler Körper sind auf bolometrischem Wege in neuerer Zeit mehrfach bestimmt worden, und man hat mit Hilfe von Prismen und Linsen aus Steinsalz, aus Sylvin und Flußspat Wärmestrahlen bis über 20 μ Wellenlänge mit Sicherheit gemessen.

Die Wärme im Haushalte der Natur. Wenn wir in das Innere unserer Erde hinabsteigen, so beobachten wir eine stetige Zunahme der Erdwärme, welche auf etwa 30 m je 1° C. beträgt. Die aus beträchtlicher Tiefe hervorquellenden artesischen Brunnen zeigen eine gleiche Temperaturerhöhung und deuten darauf hin, daß die Temperatur der heißen Quellen ebenso wie der flüssige Zustand der vulkanischen Lava durch die große Tiefe bedingt ist, aus welcher die Ergüsse emporströmen. Nun erfolgt zwar in größeren Tiefen die Wärmezunahme langsamer, als in den der Erdoberfläche naheliegenden Schichten, aber mit einer Stetigkeit, welche uns zu der Annahme zwingt,



619. Sonnenwärmespektrum.

daß es eine Region gibt, in der die Erdmasse den starren Charakter, welchen ihre Oberfläche besitzt, noch nicht erreicht hat, und daß sie von dort bis zum Mittelpunkt in feurig-flüssigem Zustande sich befindet. Sie gleicht hiernach einem riesigen geschmolzenen Tropfen, der von einer verhältnismäßig dünnen Schale umhüllt wird. Jeder andere Weltkörper weist durch seine kugelförmige Gestalt auf den gleichen Entwickelungsgang hin. Die allen eigentümliche schnelle Achsendrehung ist Ursache ihrer sphärischen Gestalt.

Als Ursache der ungeheuren Wärme, welche den feurig-flüssigen Zustand bedingt, können wir die Wirkungen chemischer Anziehung und mechanischer Verdichtung ansehen. Die Materie der Welt erfüllte ursprünglich den unendlichen Raum vor der Entstehung der Weltkörper als eine feine, nebelartige Masse, in welcher die elementaren Bestandteile, jeder mit seinen anziehenden und abstoßenden Kräften, gesondert schwebten. Zu gewissen Zeiten und an gewissen Stellen wurde das Gleichgewicht, in welchem diese Spannungen sich gegenseitig erhielten, gestört, und es erfolgte in dem Weltnebel eine teilweise Vereinigung der Materie, die sich auf mehr oder weniger große Räume erstreckte. Innerhalb derselben folgten die einzelnen Teilchen ihrer gegenseitigen Anziehung, sie vereinigten sich zu zusammengesetzten Stoffen und entwickelten dabei durch die Verdichtung und die Kompression der einzelnen Atome jene ungeheure Wärmemenge, infolge deren die neugebildeten, dichteren Körper in glühenden Zustand versetzt wurden und zuerst als glühende Dunstmassen, später bei noch weiter vorgeschrittener Abkühlung und Verdichtung als geschmolzene Tropfen in dem nun von dem kosmischen Staube freien, leeren Raume schwebten. Wir dürfen annehmen, daß diese Vorgänge durch gestörtes Gleichgewicht hervorgerufen, mit wirbelartigen Bewegungen vor sich gingen, und haben darin die Ursache der jenen Körpern eigentümlich gebliebenen Bewegungen zu suchen.

Der unendliche Weltenraum selbst ist kalt, viel kälter, als die niedrigste Temperatur, die unsere Winter mit sich bringen. Man vermutet aus verschiedenen Beobachtungen, daß die Temperatur des Weltraumes sich nicht über — 60° C. erhebt, wahrscheinlich aber noch weit darunter liegt. Nun findet unaufhörlich ein Übergang der Wärme von Körpern höherer Temperatur zu solchen tieferer Temperatur statt. Infolgedessen verloren die feurig-flüssigen Weltkörper fortwährend einen Teil der ihnen innewohnenden Wärme, und die Temperatur ihrer Masse erniedrigte sich um so schneller, je geringer ihr Volumen war. Infolge der Ausstrahlung von der Oberfläche fand allmählich ein Erkalten nach dem Innern zu statt, die Oberfläche der einst flüssigen Kugel erstarrte und nahm an Dicke immer mehr und mehr zu, bis sie eine feste Kruste bildete. Während dieser Abkühlungsprozeß nun bei Weltkörpern von kleinerem Volumen sehr rasch vor sich ging, wie z. B. bei unserem Monde, welcher jetzt eine schon völlig erkaltete Kugel ist, dauert er bei größeren Massen entsprechend länger, und bei dem Hauptkörper unseres Sonnensystems, bei der Sonne selbst, hat er glücklicherweise den Zeitpunkt noch nicht erreicht, in welchem auch nur die Oberfläche fest geworden wäre und die licht- und wärmestrahlende Kraft eines feurig-flüssigen Körpers verloren hätte. Zwischen Mond und Sonne stehen die Planeten, im Innern noch feurig lebendig, aber außen bereits abgekühlt. Bei unserer Erde nun ist bis jetzt die Erstarrung zu dem Punkte gediehen, auf welchem die Wärmeabgabe infolge ihrer fortwährenden Wärmeausstrahlung in den kälteren Weltraum genau ausgeglichen wird durch die Wärmezufuhr, welche sie durch Strahlung von der Sonne empfängt. Seit mehr als 2000 Jahren haben sich die Wärmeverhältnisse der Erde nicht wahrnehmbar geändert. Auch hat in dieser Zeit, wie die genauesten astronomischen Beobachtungen zeigen, der Durchmesser der Erde keine merkliche Veränderung seiner Länge erfahren. Eine solche Abnahme wäre aber die natürliche Folge, wenn die gesamte innere Erdwärme auch nur um den geringsten Bruchteil eines Grades sich verringert hätte.

Wie lange dieser Zustand des Gleichgewichts auch andauern, und wie ausgedehnt auch der Zeitraum sich gestalten mag, den wir unter dem Begriff „unsere Periode" zusammenfassen, so leuchtet doch ein, daß derselbe kein ewiger sein kann. Die Gesamtheit unseres Sonnensystems zahlt an den kalten, ewig mahnenden Begehrer „Weltraum" nicht die Zinsen eines Kapitals, sondern sie zehrt vom Kapitale selbst. So groß dieses ist, unerschöpflich ist es nicht. Die Sonne muß endlich auch an ihrer Außenseite erstarren, so daß sie die Wärmeunterstützung, welche sie den Planeten jetzt noch gewährt, nicht mehr in dem Maße bestreiten kann, und eine allgemeine Erstarrung bereitet sich langsam, wenn auch für unsere menschliche Anschauung nicht wahrnehmbar, vor. Durch das Aufhören der Bewegung des Mondes und durch das Zusammenfallen desselben mit unserer Erde würde diese zwar einen ungeheuren Wärmezuwachs wieder erlangen; und so können die Planeten und andere Himmelskörper, indem sie in ihren Zentralkörper wieder zurückfallen, die Temperatur desselben erhöhen und seine Lebensfähigkeit auf große Zeiträume hinaus verlängern. Allein dies ist immer nur ein Aufschub, und es muß schließlich eine Zeit kommen, in der die gesamte Materie in einem Körper sich vereinigt hat, wo Sonnen selbst mit Sonnen sich verschmolzen haben, und die zusammengehäufte Materie nur noch durch die anziehende Wirkung der Molekularkräfte Zusammenhang besitzt.

Welche Wirkung haben dann schließlich alle die Kräfte, die das wachsende Leben von heute erhalten, hervorgebracht? Was ist aus den Lichtwellen geworden, was aus den elektrischen? Hat die Ursache der magnetischen Erscheinungen spurlos aufgehört, und wohin hat sich die ungeheure Wärmemenge verloren? Die Antwort auf diese Frage lautet: Alle jene einzelnen Kraftäußerungen: Anziehung, Licht, Elektrizität, Magnetismus, sind in die eine Energieform W ä r m e verwandelt und durch Ausstrahlung von allen Punkten der Materie in den unendlichen Weltraum verteilt worden. Durch die Unendlichkeit des Raumes herrscht dann überall eine gleiche Temperatur; es gibt keinen Unterschied mehr zwischen kalt und warm, hell und dunkel, nirgends mehr Bewegung, Wechsel und Kampf, überall Friede und ungestörte Ruhe, aber auch kein Leben — denn „nur im Widerstreit schafft sich das Neue."

Vom Magnetismus.

Natürlicher Magnet. — Künstliche Magnete. — Magnetische Grunderscheinungen. — Kompaß. — Scheidungs- und Drehungstheorie. — Coulombsches Gesetz. — Einheit der Menge von Magnetismus. — Magnetisches Feld und Feldstärke. — Kraftlinien. — Magnetisches Moment. — Intensität der Magnetisierung. — Spezifischer Magnetismus. — Magnetische Induktion. — Magnetisierungskurve. — Hysteresis. — Einfluß der Temperatur auf den Magnetismus.

Es gibt in der Natur ein schwärzliches unscheinbares Mineral, welches weder zu einem Schmuckstücke noch zu irgend etwas anderem, als etwa zu einem Stückchen Eisen verarbeitet werden kann, das aber mit geheimnisvollen Kräften und mit Eigenschaften begabt ist, die nutzbringender und wertvoller sind, als die des kostbarsten Diamanten. Taucht man jenes Mineral in Eisenfeilspäne, so zeigt es ein eigentümliches Verhalten: Die Eisenfeilspäne bleiben an ihm bartähnlich haften, in großer Menge vorzugsweise an zwei entgegengesetzt gelegenen Stellen einer Außenfläche. Und wenn wir das Mineral in ein auf dem Wasser schwimmendes Schiffchen legen, dessen Kiel wir nach einer beliebigen Himmelsgegend richten mögen, immer wird es sich von selbst wieder drehen und nach einer ganz bestimmten Richtung zeigen, und zwar so, daß eine gewisse Stelle des Minerals stets nach dem geographischen Nordpol, eine andere nach dem Südpol weist. Und diese beiden merkwürdigen Stellen sind gerade diejenigen, an denen sich die Eisenfeilspäne vorzugsweise in großer Menge gruppiert hatten. Wir wissen alle, daß dieses merkwürdige Mineral das unter dem Namen **Magnet** oder **Magneteisenstein** bekannte Eisenerz ist, dessen richtende Kraft, gleich dem Faden der Ariadne, dem Schiffer den Weg zeigt in Nacht und Nebel auf der unbegrenzten Meeresfläche und ihn mit einer Sicherheit führt, als befände er sich auf einer gebahnten Straße.

Man versteht unter **Magnetismus** die Gesamtheit der magnetischen Erscheinungen und ihrer Ursachen und unter **Magnet** im allgemeinen einen Körper, welcher die Eigenschaft besitzt, Eisenteilchen anzuziehen und, falls sie nicht zu schwer sind, festzuhalten. Je nachdem diese Eigenschaft dem Körper von Natur innewohnt oder ihm durch künstliche Behandlung beigebracht worden ist, unterscheidet man **natürliche** oder **künstliche** Magnete. Zu ersteren gehört unter anderen der erwähnte Magneteisenstein, welcher eine Verbindung von Eisenoxyd mit Eisenoxydul ist, die sich von dem gewöhnlichen Eisenroste nur durch einen etwas geringeren Gehalt an Sauerstoff unterscheidet. Der Name Magnet soll von der lydischen Stadt Magnesia herrühren, in deren Nähe er in Bergwerken gefunden wurde. Er hieß auch lydischer Stein, Stein des Herkules u. s. f. und diente den Priestern der Alten schon, um ihren mysteriösen Gebräuchen einen höheren, geheimnisvollen Anschein zu geben.

Lucrez erzählt von eisernen Ringen, die an der Decke der Tempel aufgehangen einer den anderen tragen, einzig und allein durch die an den Berührungsstellen auf einander ausgeübte Anziehungskraft. Man erzählte von großen Magnetfelsen im Ozean, welche aus weiter Erfernung alles Eisen an sich zögen und die Schiffe unaufhaltsam von ihrem Wege ablenkten, noch ehe die Nähe der gefährlichen Klippen durch etwas anderes geahnt werden konnte. Dergleichen Mythen erhielten sich zum großen Nachteil der Seefahrer lange Zeit, und doch wurde gerade jene Kraft, welche man einst für so gefahrdrohend für die Schifffahrt hielt, der sichere Führer und Leitstern, welcher den Forschungstrieb und den Mut zur Durchschiffung des unbekannten Weltmeeres belebte.

In Europa scheint man im Altertum nur die Tragkraft des Magnets bewundert zu haben; die Chinesen dagegen scheinen schon 1900 Jahre vor unserer Zeitrechnung kleine magnetische Wagen besessen zu haben, welche ihnen durch eine darauf angebrachte, stets nach Süden gerichtete Figur den Weg durch die unermeßlichen Steppen der Tartarei zeigten. Im 3. Jahrhundert n. Chr. bedienten sich die Chinesen schon einer an einem Seidenfaden aufgehängten Magnetnadel, während man im Abendlande und zwar wahrscheinlich zuerst bei den seefahrenden Nationen des Nordens den Magnetstein selbst an einem Faden aufhing oder auf ein Brettchen legte, das man auf ruhigem Wasser schwimmen ließ. In dem um das Jahr 1180 geschriebenen, altfranzösischen Roman von der Rose wird des Magnets unter dem Namen Marinette gedacht, was auf Beziehungen zur Schifffahrt schließen läßt.

Marco Polo soll den Gebrauch der Magnetnadel von den Chinesen erlernt haben. Die eigentliche Erfindung der Anwendung seiner Richtkraft schreibt man indessen einem gewissen Flavio Gioja aus dem Neapolitanischen zu, der um das Jahr 1300 lebte. Weil der Magnet den Reisenden leitete, hieß er bei den nordischen Völkern Leitstein oder auch Leitarstein, und es ist wahrscheinlich, daß Magnete schon in sehr frühen Zeiten in Norwegen und Schweden gefunden worden sind; ihr Vorkommen beschränkt sich nämlich keineswegs auf die lydischen Bergwerke, man findet den Magneteisenstein vielmehr in großer Menge auch in Lagern und Stöcken bei Dannemora, Arendal, in Sibirien, in England, im Harz, in Sizilien und in vielen anderen Gegenden, in denen er als das beste Erz zur Gewinnung von Eisen verarbeitet wird. Die natürlichen Magnete kann man in ihrer Wirkung, besonders ihrer Tragfähigkeit bedeutend verstärken, wenn man ihre beiden Polseiten mit eisernen Schienen bekleidet, welche in zwei stärkere, einander nahe gegenüberstehende Enden auslaufen. Diese beiden Enden verbindet man dann durch einen Eisenstab, den Anker (Abb. 620). Ein auf solche Weise armierter Magnet vermag oft mehr als das Zweihundertfache seines eigenen Gewichts zu tragen.



620. Armierung des Magnets.

Künstliche Magnete. Die magnetischen Eigenschaften lassen sich auch auf künstliche Weise verschiedenen Körpern mitteilen. Eisen, Stahl, Nickel, Kobalt können, sei es durch Einwirkung eines in ihrer Nähe befindlichen Magnets oder durch gewisse Behandlungsmethoden (Streichen) mittels eines oder zweier Magnete, oder mittels eines galvanischen Stroms, vorübergehend oder dauernd zu künstlichen Magneten gemacht werden. Der Form nach unterscheidet man Stabmagnete, Hufeisenmagnete, Ringmagnete u. s. w. Mehrere Magnete vereinigt man in passender Weise, gewöhnlich in Form eines Hufeisens, zu einem sogenannten magnetischen Magazin oder Lamellarmagnet (Abb. 621).



621. Hufeisen-lamellarmagnet.

Als Elektromagnet bezeichnet man eine von einem galvanischen Strom durchflossene Drahtspirale, welche einen Eisenkern enthält und auch wohl eine von einem galvanischen Strom durchflossene Drahtspirale allein (Solenoid). Die magnetische Wirkung eines Magnets tritt, wie bereits erwähnt, nicht an allen Punkten seiner Oberfläche in gleichmäßiger Stärke auf, sie scheint sich vielmehr im allgemeinen an zwei Stellen zu konzentrieren, zwischen denen es stets eine Stelle gibt, die gar keine anziehende Wirkung auf Eisen ausübt, und welche bei einem Magnetstabe in der Mitte desselben, bei einem Hufeisenmagnet an der Kniestelle liegt. Ebenso nämlich, wie beim natürlichen Magneteisenstein, haften auch bei einem gleichförmig magnetisierten Stahlstabe, wenn man ihn in Eisenfeilspäne taucht, nach dem Herausheben diese in der Nähe der beiden Enden in größter Anzahl, während die Mitte des Stabes frei von ihnen bleibt. Man nennt die Stellen stärkster Wirkung die Pole des Magnets und die zwischen ihnen befindliche nach außen hin unwirksame Stelle, die indifferente oder neutrale Zone oder auch den magnetischen Äquator des Magnets. In gewissen Fällen ungleichförmiger Magnetisierung kann ein Magnetstab mehr als zwei Pole besitzen; diese heißen dann Folgepunkte oder Folgepole. Im allgemeinen besitzt ein Magnet zwei Pole.

Magnetische Grunderscheinungen. Die Pole betrachtet man gewöhnlich als Kraftzentren obwohl diese Auffassung, streng genommen, nur zulässig ist bei sehr langen, dünnen, gleichförmig und longitudinal magnetisierten Stäben. Die Verbindungslinie der beiden (idealen) Pole heißt die magnetische Achse des Magnets.

Zwischen den beiden Polen eines frei beweglichen Magnets zeigt sich, wie bereits erwähnt, ein wesentlicher Unterschied: der eine Pol ist stets nach Norden, der andere nach Süden gerichtet. Man nennt deshalb den ersteren den Nordpol oder auch den positiven oder bezeichneten Pol, den anderen den Südpol oder den negativen oder unbezeichneten Pol des Magnets.

Ferner verhalten sich die beiden Pole eines Magnets einem zweiten Magnet gegenüber in entgegengesetzter Weise: der Nordpol des einen zieht den Südpol des anderen an und stößt dessen Nordpol ab, und umgekehrt; hieraus folgt das Grundgesetz: Gleichnamige Magnetpole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an.

Des Weiteren folgt aus diesem Verhalten, daß die Erde selbst als ein großer Magnet zu betrachten ist, dessen Südpol in der Nähe des geographischen Nordpols, und dessen Nordpol in der Nähe des geographischen Südpols liegt. Naturgemäßer wäre es, die Erde als einen Magnet zu betrachten, dessen Nordpol in der Nähe des geographischen Nordpols, und dessen Südpol in der Nähe des geographischen Südpols liegt und demgemäß den nach Norden zeigenden Pol einer Magnetnadel als Südpol und den nach Süden zeigenden als Nordpol zu bezeichnen. Man ist indessen allgemein übereingekommen, die erstere Betrachtungsweise zu wählen.

Legt man an den Nordpol eines Magnets den Südpol eines zweiten gleich starken Magnets, so verschwindet an der Berührungsstelle die magnetische Wirkung. Letztere zeigt sich nur an den beiden Enden.

Konstitution eines Magnets. Scheidungs- und Drehungstheorie. Die magnetischen Erscheinungen sind ihrem Wesen nach molekularer Natur. Zerbricht man einen gleichförmig magnetisierten, längeren Magnetstab in seiner Mitte, so ist jede Hälfte, wie der Versuch zeigt, wieder ein vollständiger Magnet mit zwei Polen und neutraler Zone. Zerbricht man jede Hälfte abermals, so erhält man wieder je zwei vollständige Magnete; soweit man auch die Teilung fortsetzen mag, das kleinste Bruchstück bildet stets noch einen vollständigen Magnet mit zwei Polen und neutraler Zone. Man gelangt auf diese Weise zu der Vorstellung, daß der Magnetismus eine den kleinsten Teilen eines Magnets anhaftende, also eine molekulare Erscheinung ist, und daß jeder Magnet aus magnetischen Molekülen oder Molekularmagneten besteht, welche für unsere Wahrnehmung unmerklich kleine Dimensionen haben.

Zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen sind vorzugsweise zwei Theorieen aufgestellt worden: die Scheidungs- und die Drehungstheorie. Die hauptsächlich von Coulomb ausgebildete Scheidungstheorie nimmt als Ursache des Magnetismus zwei magnetische Materien, imponderable Flüssigkeiten oder Fluiden an, die entgegengesetzte Eigenschaften haben und daher auch nordmagnetische und südmagnetische oder positive und negative Flüssigkeiten heißen. In jedem Molekül eines magnetischen Körpers oder eines Körpers, der fähig ist, magnetisch zu werden, sind beide magnetischen Flüssigkeiten in gleicher Menge und vor der Magnetisierung gleichmäßig durch einander gemischt vorhanden; sie können sich weder vermindern noch vermehren. Der Akt der Magnetisierung soll darin bestehen, daß die beiden Flüssigkeiten in den Molekülen getrennt und in den einander entgegengesetzten Enden derselben angehäuft werden. Die Trennung ist um so vollkommener, je stärker die magnetisierende Kraft ist. Der Wiedervereinigung der beiden getrennten Fluiden wirkt eine besondere Kraft entgegen, welche Koercitivkraft heißt, die verschieden groß ist für die verschiedenen magnetischen Körper, insbesondere für harten Stahl größer ist als für weiches Eisen.

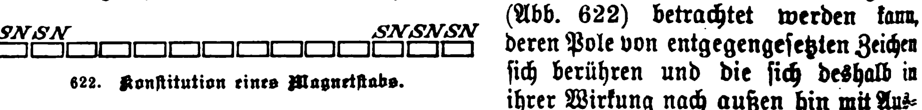
Weiches Eisen läßt sich infolgedessen viel leichter magnetisieren, als harter Stahl. Hat aber die magnetisierende Kraft zu wirken aufgehört, so verliert weiches Eisen sehr schnell seine magnetischen Eigenschaften, während harter Stahl sie beibehält. Man hat daher weiches Eisen und harten Stahl in Bezug auf ihre Magnetisierbarkeit und ihre Fähigkeit, den Magnetismus zu bewahren, treffend verglichen mit zwei Arten des menschlichen Gedächtnisses. Das weiche Eisen entspricht dem memoria capax, welches schnell auffaßt und ebenso schnell wieder vergißt, während harter Stahl dem memoria tenax gleicht, das zwar schwerer faßt, dafür aber desto sicherer das einmal Erfaßte festhält.

Nach der vorzugsweise von Wilhelm Weber entwickelten Drehungstheorie sind die magnetischen Flüssigkeiten in den einzelnen Molekülen der magnetischen Körper von vornherein in bestimmten Richtungen, den magnetischen Achsen der Moleküle, von einander getrennt; jedes Molekül bildet für sich einen vollständigen Magnet, es ist an einem Ende mit einer bestimmten Quantität nordmagnetischen, am anderen Ende mit der gleichen

Quantität südmagnetischen Fluidums versehen; diese Fluida sind eine dem Molekül inhärente Eigenschaft und können weder vermehrt noch vermindert werden. In einem unmagnetischen Stabe liegen indessen die Molekularmagnete mit ihren magnetischen Achsen nach allen Richtungen durcheinander und üben deshalb nach außen keine Wirkung aus. Der Akt der Magnetisierung besteht nun darin, daß alle Moleküle um ihren Schwerpunkt derart gedreht werden, daß die mit nordmagnetischem Fluidum versehenen Enden nach der einen und die mit südmagnetischem Fluidum versehenen nach der anderen Seite gerichtet sind, und demgemäß der Stab eine bestimmte Polarität erhält. Die Drehung wird um so leichter und vollkommener stattfinden, je geringer der Widerstand oder die innere Reibung ist, welche die Moleküle der Drehung entgegensetzen. Dieser Widerstand, der an Stelle der Koercitivkraft angenommen werden muß und der bei den verschiedenen magnetischen Körpern verschieden, beim weichen Eisen z. B. geringer ist als beim harten Stahl, hindert die infolge der Magnetisierung gerichteten Moleküle, wieder in ihre ursprüngliche (unmagnetische) Gleichgewichtslage zurückzukehren.

Die Drehungstheorie wird in der Regel in der neueren Zeit den Betrachtungen über Magnetismus zu Grunde gelegt. Gegenüber der Scheidungshypothese besitzt sie auch einen höheren Grad von Wahrscheinlichkeit infolge gewisser Beziehungen zwischen magnetischen und rein mechanischen Erscheinungen: So zeigt sich z. B., daß ein Eisenstab, während er magnetisiert wird, sich in Richtung seiner Magnetisierung verlängert, ferner, daß beim Magnetisieren und Entmagnetisieren eines Eisenstabes ein seinem Longitudinalton gleicher Ton erzeugt wird, und daß es für die Stärke der Magnetisierung eine obere Grenze, die Sättigungsgrenze, gibt.

Im allgemeinen ist die magnetische Verteilung und Wirkung eines Magnets nach außen hin sehr kompliziert und schwierig zu bestimmen. Bei einem hinreichend langen, dünnen Magnetstab aber, der als eine zusammenhängende Reihe von Molekularmagneten (Abb. 622) betrachtet werden kann, deren Pole von entgegengesetzten Zeichen sich berühren und die sich deshalb in ihrer Wirkung nach außen hin mit Ausnahme des ersten und letzten Poles aufheben, reduziert sich die magnetische Wirkung nach außen auf diejenige dieser beiden Endpole, die allein freien Magnetismus besitzen und als Kraftzentren anzusehen sind.

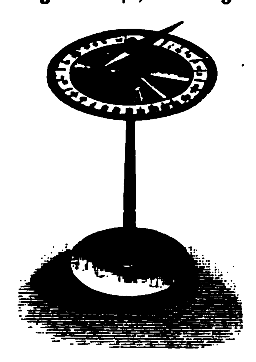


622. Konstitution eines Magnetstabs.

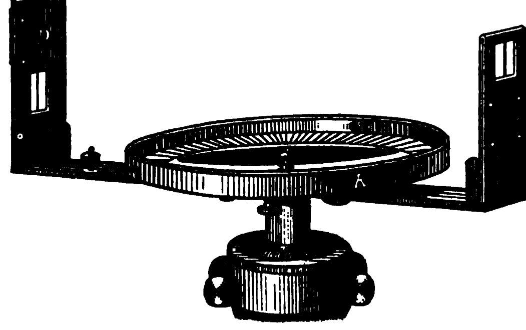
Der Kompaß oder die Bussole. Die älteste und wichtigste Anwendung der magnetischen Erscheinungen besteht im wesentlichen in einer Magnetnadel, welche sich um eine durch ihren Schwerpunkt gehende, vertikale Achse frei bewegen kann (Abb. 623). Die Richtung, welche die Nadel sich selbst überlassen in ihrer Gleichgewichtslage stets einnimmt, dient als Wegweiser bei den verschiedensten Unternehmungen. Nicht nur Seefahrer bedienen sich ihrer, sondern auch Ingenieure bei ihren oberirdischen, Bergleute bei ihren unterirdischen Vermessungen, Geologen zur Bestimmung des Streichens und Fallens der Gebirgsschichten, Landreisende, Astronomen, Physiker machen von ihr Gebrauch, und entsprechend diesen mannigfachen Anwendungen ist auch die Bussole verschieden eingerichtet. Bald ist die Nadel in ihrem Schwerpunkte an einem Faden aufgehängt, bald ist sie in ihrem Schwerpunkte mit einem fein polierten Achathütchen versehen, welches auf der Spitze eines senkrechten Stiftes ruht, um welches sie die Schwingungen ausführt. Unterhalb der Magnetnadel befindet sich ein fein geteilter Kreis, auf welchem man die Größe der Ablenkung irgend einer Richtung von der Nulllinie ablesen kann.

In Abb. 624 ist eine Bussole, wie sie in der Feldmeßkunst vielfach angewandt wird, dargestellt. Sie besteht aus einem in halbe Grade geteilten Kreise, in dessen Mittelpunkt die Magnetnadel angebracht ist. Kreis und Nadel befinden sich in einer oben durch eine Glasplatte verschlossenen Metallkapsel K, die an ihrer unteren Fläche mit einer Vorrichtung behufs Befestigung an einem einfachen Stative versehen ist. Zwei sich diametral gegenüberstehende Diopter D D, welche bei der Fernrohrbussole durch ein mit Fadenkreuz versehenes Fernrohr ersetzt sind, ermöglichen das Anvisieren bestimmter Punkte.

Der **Schiffskompaß** besteht im wesentlichen aus einer Windrose, unter welcher ein System von 2—8 kleinen Magneten symmetrisch zu ihrem Mittelpunkte befestigt ist (Abb. 625). Die Windrose, welche einen Stern mit 32 äquidistanten, die Lage der Himmelsgegenden anzeigenden Strahlen bildet, ruht mit einem in ihrer Mitte angebrachten Achat- oder Rubinhütchen auf einer sehr feinen, in der Mitte des messingnen Kompaßkessels befindlichen Spitze und kann, wenn man ihrer Angaben nicht bedarf, durch eine Arretierungsvorrichtung arretiert werden. Der oben durch eine Glasplatte verschlossene Kompaßkessel ist wegen der Schiffsschwankungen in einer sogenannten **Cardanischen Aufhängung** gelagert, das sind zwei in einander leicht bewegliche Ringe, deren Achsen rechtwinkelig auf einander stehen. An dem in der Innenwand des Kompaßkessels angebrachten **Steuerstrich** läßt sich die relative Lage der Windrose zur Kielrichtung des Schiffes, also auch der Kurs, jederzeit bestimmen. In neuerer Zeit ist man bestrebt, die Rosen möglichst leicht und beweglich und dabei doch von großem magnetischen Moment zu konstruieren. Die Rose von Sir **William Thomson** (Lord **Kelvin**) besteht aus einem durch Seidenfäden mit dem Achathütchen verbundenen Aluminiumring und aus acht feinen, in Seidenfäden symmetrisch hängenden Magnetnadeln. Um der Rose, trotz ihrer Leichtigkeit und Beweglichkeit, bei den durch den Seegang und den Maschinengang bedingten Erschütterungen des Schiffes mehr Stabilität zu verleihen, wird der Kompaß-



623. Magnetnadel.

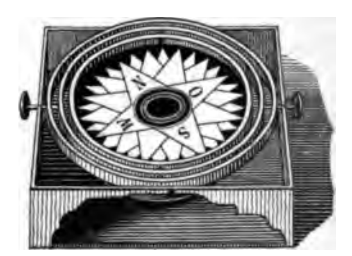


624. Feldmesserkompaß.

kessel mit einer Flüssigkeit (Spiritus oder Glycerin) gefüllt. Solche **Fluid-** oder **Schwimmkompasse** sind fast allgemein in der deutschen Marine eingeführt.

Coulombsches Gesetz. Einheit der Menge von Magnetismus. Wir messen nun die Mengen von Magnetismus, welche die Pole eines Magnets enthalten, durch die Wirkungen, die sie auf einen anderen Magnet ausüben. Zwei Mengen von Magnetismus sind gleich groß, wenn sie aus derselben Entfernung auf einen und denselben Magnet identische Wirkungen ausüben; sie sind gleich, aber von entgegengesetztem Zeichen, wenn sie aus derselben Entfernung auf einen und denselben Magnet gleich große Wirkungen, aber in entgegengesetztem Sinne, ausüben. Eine Menge μ von Magnetismus endlich ist n-mal größer als eine Menge μ_1, wenn die Wirkung von μ auf einen anderen Magnet n-mal größer ist, als diejenige von μ_1 unter denselben Umständen.

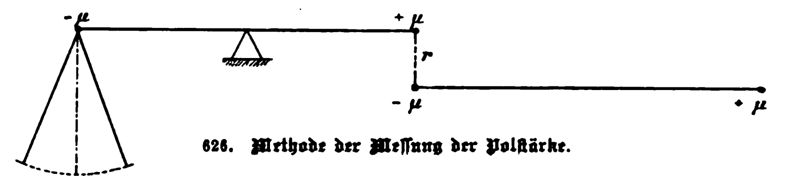
Denkt man sich einen sehr langen und dünnen Magnetstab, dessen Pole die Mengen $+\mu$ und $-\mu$ enthalten mögen, in seiner Mitte, etwa durch eine Schneide unterstützt, so daß er einen gleicharmigen Wagebalken bildet, und unterhalb desselben in der Entfernung r einen zweiten, ebenfalls sehr langen und dünnen Magnetstab mit denselben Polstärken, wie nebenstehende Abb. 626 zeigt, in fester Lage, so würde der Pol $+\mu$ des beweglichen Magnets infolge der Anziehung sich nach $-\mu$ hin bewegen; diese Anziehung könnte aber aufgehoben werden durch ein Gewicht, das auf das andere Ende $-\mu$ des beweglichen Magnets



625. Schiffskompaß.

aufgelegt würde, und dessen Größe abhängig ist von der Größe von μ einerseits und der Entfernung r andererseits; ferner ist ersichtlich, daß sich auch umgekehrt μ als eine Funktion dieses Gewichtes und der Entfernung r, d. h. in absolutem Maße, wird darstellen lassen müssen.

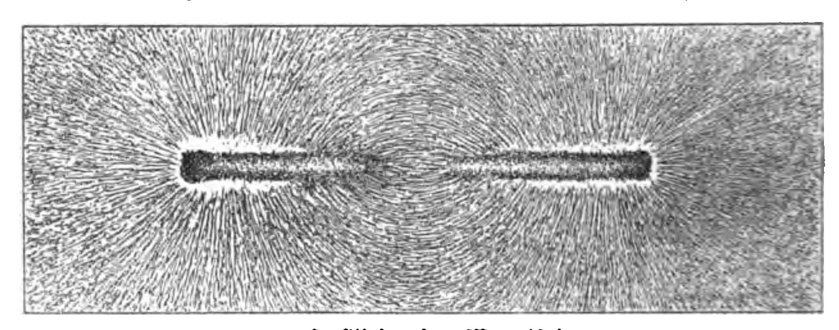
Die quantitativen Beziehungen der magnetischen Anziehung und Abstoßung sind nun von Coulomb auf der nach ihm benannten (Coulombschen) Drehwage ermittelt worden unter Anwendung von Magnetstäben von solcher Länge, daß bei der Untersuchung der Wirkung eines Pols derselben diejenige des zweiten Pols vernachlässigt werden konnte.



626. Methode der Messung der Polstärke.

Die Versuche ergaben das wichtige Gesetz, daß zwei Mengen von Magnetismus, die in zwei Polen konzentriert gedacht werden können, auf einander eine Kraftwirkung ausüben, deren Richtung in die gerade Verbindungslinie der beiden Pole fällt, und deren Größe direkt proportional ist dem Produkte der beiden Mengen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung der beiden Pole.

Für die Einheit der Menge von freiem Magnetismus, oder was dasselbe ist, für die Einheit der Stärke eines magnetischen Poles, oder auch kurz für die Einheit des magnetischen Poles ergibt sich folgende Definition: Die absolute Einheit der Menge von


627. Kraftlinien eines Magnetstabs.

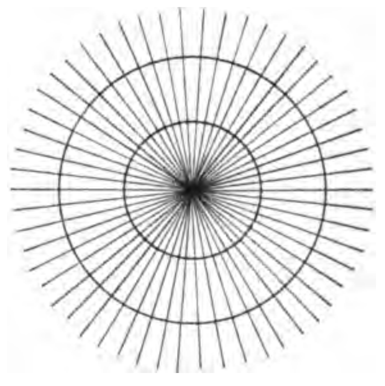
freiem Magnetismus ist diejenige Menge Nord- oder Südmagnetismus, welche in einem Pole vereinigt gedacht, auf eine gleich große Menge, die in einem zweiten Pole, in einem der Längeneinheit gleichen Abstande vereinigt gedacht wird, eine Anziehungs- oder Abstoßungskraft ausübt, welche gleich der absoluten Krafteinheit ist.

Im Zentimeter-Gramm-Sekunde- (C. G. S.) System ist also die Einheit der Menge von freiem Magnetismus diejenige, welche auf eine gleich große um 1 cm von ihr entfernte Menge (beide in Punkten konzentriert gedacht) die Kraftwirkung einer Dyne (etwas mehr als die Kraftwirkung von 1 Milligramm) ausübt.

In dem vorigen Beispiele (Abb. 626) würden die Magnetpole μ die Polstärke Eins besitzen, wenn die Entfernung r gleich 1 cm und die zur Herstellung des Gleichgewichts nötige Gewichtszulage etwas mehr als 1 mg betrüge.

Magnetisches Feld. — Feldstärke. Unter einem magnetischen Felde versteht man jeden Raum, in dessen Punkten eine magnetische Kraftwirkung stattfindet. Jeder Raum der Erdoberfläche wird daher ein magnetisches Feld sein. Sieht man indessen einstweilen von dem durch den Magnetismus der Erde allein hervorgerufenen Felde magnetischer Kraft ab, so versteht man unter einem magnetischen Felde jeden Raum, in welchem durch die Anwesenheit eines Magnets an jedem Punkte eine magnetische Wirkung ausgeübt wird derart, daß, wenn in diesen Raum ein magnetischer Pol gebracht wird, derselbe an jedem Punkte eine Anziehung oder Abstoßung erfährt, welche er ohne die

Anwesenheit des Magnets nicht erfahren würde. Ein freier Magnetpol kommt zwar in der Natur nicht vor und läßt sich auch, da jeder Magnet mindestens zwei Pole besitzt, praktisch nicht herstellen. Angenähert aber kann man, wie dies schon bei den vorhergehenden Betrachtungen geschehen ist, einen freien Magnetpol herstellen, wenn man den Magnet im Vergleich zu der Stärke seiner Pole so lang wählt, daß bei der Untersuchung der Wirkung des einen Pols der störende Einfluß des anderen vernachlässigt werden kann. Im allgemeinen wird die Richtung und die Größe der auf den Magnetpol ausgeübten magnetischen Kraft in jedem Punkte des Kraftfeldes verschieden sein. Denkt man sich daher den Magnetpol, dessen Stärke so klein gewählt sein möge, daß durch ihn der magnetische Zustand des Feldes in keinem Punkte eine Änderung erfährt, in dem Felde frei beweglich, so daß er den auf ihn wirkenden Anziehungs- und Abstoßungskräften frei folgen kann, so wird er im allgemeinen eine krummlinige Bahn beschreiben, deren Tangente in jedem ihrer Punkte mit der Richtung der daselbst wirkenden resultierenden magnetischen Kraft zusammenfällt. Solche Kurven werden nach dem Vorgange von Faraday **Kraftlinien** genannt. Man kann sich von dem Verlaufe derselben durch einen bekannten Versuch angenähert eine Vorstellung verschaffen: Legt man auf einen gleichförmig magnetisierten Magnetstab ein Blatt Papier oder eine Scheibe von Glas und streut darauf durch ein feines Sieb Eisenfeilspäne, so ordnen sich diese, wenn man die Scheibe durch gelindes Klopfen erschüttert, in zusammenhängenden Fäden an, welche annäherungsweise den Verlauf der Kraftlinien in einer Horizontalebene des magnetischen Feldes veranschaulichen und demgemäß ein ungefähres Bild über die Verteilung der magnetischen Kraft gewähren (Abb. 627).



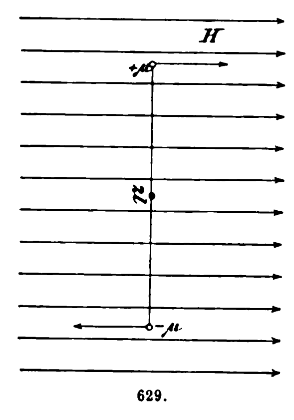
628. Kraftlinien.

Solche Kraftlinien müssen wir uns nach dem Vorgange von Faraday (auch ohne die Eisenfeilspäne) bloß durch die Anwesenheit des Magnets im Kraftfelde bestehend denken. Obschon sie in Wirklichkeit nicht existieren, gewähren sie eine zweckmäßige Vorstellung und ein geistiges Bild für den Zusammenhang der magnetischen und mechanischen Kräfte, die in dem Kraftfelde herrschen. Sie können als eine graphische Darstellung der Wirkung einer Kraft aufgefaßt werden. Wir können uns eine gegen die Erde hin fallende Masseneinheit z. B. so vorstellen, als wäre an der Masse ein Faden befestigt, der mit konstanter Kraft immer nach dem Mittelpunkt der Erde gezogen würde; weiter können wir uns vorstellen, daß eine große und doch konstante Anzahl solcher Fäden vom Erdzentrum nach symmetrisch auf der Erdoberfläche verteilten Punkten ausgehen, welche auf diese die Wirkung der irdischen Schwere darstellen. Die Kraftlinientheorie ist für die Entwickelung der neueren Elektrotechnik von großer Bedeutung geworden. Es wird in der mathematischen Physik gezeigt, daß, je weiter die Kraftlinien im Raume sich von einander entfernen, desto schwächer die Kraftwirkung an diesen Stellen des Raumes wird, und je mehr die Kraftlinien im Raume sich nähern, desto stärker an diesen Stellen des Raumes die Kraft ist, oder präziser, daß die Intensität der Kraft an allen Stellen des Raumes proportional ist der Anzahl der durch die Flächeneinheit hindurchgehenden Kraftlinien.

Unser Versuch mit den Eisenfeilspänen zeigt in der That, daß die Kurven um so schwächer verlaufen, je weiter sie sich von den Polen entfernen. Die Anzahl der Kraftlinien, welche durch die Raumeinheit an verschiedenen Punkten des magnetischen Kraftfeldes gehen, ist verschieden, und man wird festsetzen können, daß die Feldstärke an irgend einem Punkte gemessen wird durch die Anzahl der Kraftlinien, welche daselbst durch die Einheit des Raumes hindurchgehen. Demgemäß können wir ein gleichförmiges magnetisches Feld von der Stärke Eins als ein solches definieren, in welchem die Flächeneinheit, d. h. also ein Quadratzentimeter, rechtwinkelig von einer einzigen Kraftlinie durchsetzt wird. Um nun

die von einem Magnetpol von der Stärke μ ausgehende Anzahl von Kraftlinien, welche strahlenförmig in den Raum sich erstreckende Geraden sind, zu bestimmen, denke man sich um den Magnetpol als Mittelpunkt eine Kugel vom Radius r beschrieben; alsdann wird ein auf der Kugeloberfläche befindlicher, in Bezug auf μ ungleichnamiger Einheitspol, an welcher Stelle der Kugeloberfläche er sich auch befinden möge, von dem Magnetpol μ nach dem Coulombschen Gesetze stets mit der Kraft angezogen $\frac{\mu \cdot 1}{r^2}$; hieraus folgt, daß die Dichtigkeit der Kraftlinien auf der ganzen Kugeloberfläche gleich sein muß, und daß die durch die Flächeneinheit der Kugeloberfläche senkrecht hindurchgehende Anzahl der Kraftlinien ebenfalls $\frac{\mu \cdot 1}{r^2}$ ist. Da nun der Flächeninhalt der ganzen Kugeloberfläche $= 4\pi r^2$ ist, so ist die Gesamtanzahl der vom Magnetpole μ ausgehenden und die Kugeloberfläche durchsetzenden Kraftlinien $= 4\pi r^2 \cdot \frac{\mu}{r^2} = 4\pi\mu$. Ist der betrachtete Pol μ ein Einheitspol, also $\mu = 1$, so gehen von ihm demnach 4π Kraftlinien aus.

Ist die Resultante der magnetischen Kraft in allen Punkten eines magnetischen Feldes der Größe und Richtung nach konstant, so heißt das Feld **homogen**; die Kraftlinien in einem homogenen magnetischen Felde sind äquidistante, parallele Geraden. Für ein nicht zu langes Zeitintervall kann ein kleinerer Raum der Erde, z. B. ein von Eisenteilen freies Laboratorium, als homogenes magnetisches Feld betrachtet werden. Hängt man in einem solchen Raum eine Anzahl von Magnetnadeln frei beweglich in solchen Entfernungen von einander auf, daß sie sich gegenseitig nicht merklich beeinflussen, so nehmen alle in ihrer Ruhelage dieselbe Richtung an. Die Magnetnadeln stellen die Kraftlinien des magnetischen Feldes dar, welche in diesem Falle parallele Geraden sind.



629.

Die Feldstärke in einem beliebigen Punkte eines magnetischen Feldes wird gemessen durch die Kraft, die daselbst auf den Magnetpol Eins ausgeübt wird. Allgemein wird diese Kraft P proportional sein der Intensität H des Feldes in dem betrachteten Punkt und der Stärke μ des Poles, die Kraft wird sich also darstellen lassen durch das Produkt $P = H\mu$, woraus $H = \frac{P}{\mu}$ folgt.

Setzt man in diese Gleichung $P = 1$ (Einheit der Kraft) und $\mu = 1$ (Einheit des Magnetpols), so ergibt sich auch $H = 1$ und demgemäß folgende Definition für die Einheit der Stärke des magnetischen Feldes: In einem Punkte eines magnetischen Feldes herrscht die Stärke Eins, wenn in demselben auf den Magnetpol Eins die Krafteinheit ausgeübt wird, d. h. also wenn daselbst auf den Magnetpol Eins die Kraft von etwa 1 mg ausgeübt wird. Für die Einheit der magnetischen Feldstärke wird häufig die in neuerer Zeit vorgeschlagene Bezeichnung G a u ß angewandt.

M a g n e t i s c h e s M o m e n t. Bringt man einen gleichförmig magnetisierten, beweglichen Magnetstab, dessen Pole die Stärke $+\mu$ und $-\mu$ haben mögen, und dessen Poldistanz $2\,l$ sei, in ein homogenes magnetisches Feld von der Stärke H, so übt dieses auf die beiden, gleich starken, aber ungleichnamigen Pole des Magnets zwei gleiche, parallele und entgegengesetzt gerichtete Kräfte aus, welche ein Kräftepaar bilden und die magnetische Achse des Magnets parallel zur Richtung des Kräftepaars, d. h. parallel zu den Kraftlinien des magnetischen Feldes zu drehen streben.

Befand sich die magnetische Achse des Magnets ursprünglich senkrecht zu diesen Kraftlinien (Abb. 627), so ist das Moment dieses in seinen Polen angreifenden Kräftepaares gleich $P \cdot 2\,l$, wenn P die Kraft ist, die auf jeden der beiden Pole wirkt. Diese Kraft P ist aber nach dem Vorhergehenden gleich dem Produkte aus der Stärke μ des Pols und der Feldstärke H, $P = \mu \cdot H$.

Das Drehungsmoment D des Kräftepaares ist also $= 2\,l \cdot \mu \cdot H$.

Man nennt nun das Produkt $\mu \cdot 2l$ aus der Intensität μ jedes der beiden Magnetpole in ihre Distanz $2l$ das magnetische Moment des Magnetstabs oder auch wohl seinen Stabmagnetismus.

Die Einheit des magnetischen Moments ist dasjenige eines Magnets, dessen beide Pole die Einheit der Polstärke besitzen, und deren Abstand gleich der Längeneinheit ist.

Das magnetische Moment eines Magnets ist einer der wichtigsten Begriffe aus der Lehre vom Magnetismus. Seine Bestimmung bildet die Grundlage der meisten magnetischen Maßbestimmungen. Auch die folgenden Begriffe, welche in der Elektrotechnik in neuerer Zeit vielfach Anwendung finden, sind von ihm abgeleitet.

Intensität der Magnetisierung. Denkt man sich einen gleichförmig magnetisierten Magnetstab in seiner Mitte quer durchbrochen, so würden die beiden Magnete dieselbe Polstärke, aber nur ein halb so großes magnetisches Moment besitzen, wie der ursprüngliche Magnet. Denkt man sich den ursprünglichen Magnet der Länge nach halbiert, so würde die Polstärke der beiden Teile und also ihre magnetischen Momente wieder nur halb so groß sein, wie das des ursprünglichen Magnets; allgemein: das magnetische Moment eines Teiles eines gleichförmig magnetisierten Magnets verhält sich zum magnetischen Moment des ganzen Magnets, wie das Volumen jenes Teiles zum Gesamtvolumen. Der magnetische Zustand eines Magnets kann daher durch das der Volumeneinheit zukommende magnetische Moment beurteilt werden. Diese Größe wird Intensität der Magnetisierung genannt. Die Intensität der Magnetisierung eines gleichförmig magnetisierten Magnets ist also das Verhältnis seines magnetischen Moments zu seinem Volumen. Die Intensität der Magnetisierung eines Magnets ist Eins, wenn auf die Volumeneinheit (1 ccm) die Einheit des magnetischen Momentes kommt.

Spezifischer Magnetismus. Unter spezifischem Magnetismus eines Magnets versteht man das Verhältnis seines magnetischen Moments zu seiner Masse. Die Einheit des spezifischen Magnetismus besitzt ein Magnet, wenn der Masseneinheit (1 g) seiner Substanz die Einheit des magnetischen Moments zukommt. Bei guten Stahlmagneten beträgt der spezifische Magnetismus etwa 40 bis zu 100 absolute Einheiten.

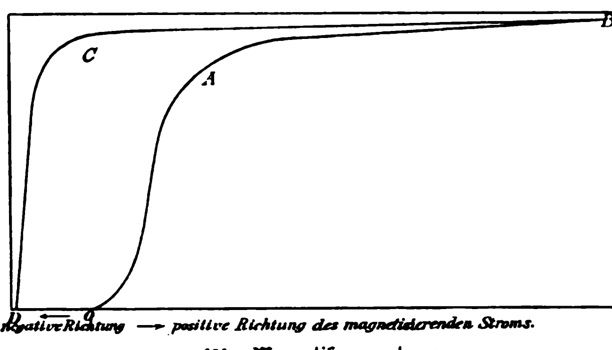
Magnetische Induktion. Wird ein Eisenstück oder ein Körper, der fähig ist, magnetisch zu werden, in die Nähe eines Magnetpoles gebracht, so wird das Eisenstück durch Induktion magnetisch, und zwar wird in der Nähe des Südpols des ursprünglichen Magnets ein Nordpol und in der Nähe des Nordpols des ursprünglichen Magnets ein Südpol erzeugt. Übrigens beschränkt sich die Einwirkung des Magnets nicht bloß auf Eisen, Nickel und Kobalt, sondern, wie Faraday gezeigt hat, auf alle festen, flüssigen oder gasförmigen Körper. Alle Körper werden, wenn sie in ein magnetisches Feld gebracht werden, magnetisiert. Man kann die Körper indessen in zwei Hauptgruppen teilen, nämlich in paramagnetische (ferromagnetische), d. h. solche, welche von den Polen eines Magnets angezogen werden, wie Eisen, Nickel, Kobalt u. s. w., und in diamagnetische, d. h. solche, welche von den Polen eines Magnets abgestoßen werden, wie Wismut, Zink, Wasser u. s. w.

Wird ein Eisenstab in ein magnetisches Feld gebracht, so ist die Anzahl der Kraft- oder Induktionslinien, welche an irgend einer Stelle durch die Flächeneinheit im Inneren des Stabes hindurchgehen, größer als die Anzahl der Kraftlinien, welche an dieser Stelle durch die Flächeneinheit des Feldes gehen. Man sagt, das Eisen hat eine größere Aufnahmefähigkeit oder nach Faraday eine bessere Leitungsfähigkeit für die Induktionslinien, als der umgebende Raum, indem man sich vorstellt, daß die Kraftlinien in dem Eisenstabe, weil er ihnen einen leichteren Durchgang bietet, als das umgebende Medium, sich gewissermaßen zusammendrängen. Man nennt diese Eigenschaft nach dem Vorgange von William Thomson Permeabilität und bezeichnet sie gewöhnlich mit dem Buchstaben μ. Permeabilität einer Substanz ist demnach das Verhältnis der magnetischen Induktion an irgend einer Stelle der Substanz zu der magnetischen Kraft daselbst.

Die Einheit der Permeabilität besitzt eine Substanz, für welche die magnetische Induktion gleich der magnetischen Kraft ist. Der leere Raum und nahezu auch die atmosphärische Luft haben die Permeabilität Eins. Den reziproken Wert von μ, also $\frac{1}{\mu}$,

nennt man, indem man μ als magnetische Leitungsfähigkeit auffassen kann, den spezifischen magnetischen Widerstand der Substanz. Er ist das Analogon zum spezifischen elektrischen Widerstand, d. i. (wie wir später sehen werden) der elektrische Widerstand eines Leiters von der Länge Eins und dem Querschnitt Eins. In den paramagnetischen Körpern ist die Permeabilität größer (und zwar im Eisen, Nickel und Kobalt sehr bedeutend), in den diamagnetischen dagegen nur wenig kleiner, als im leeren Raume.

Magnetisierungskurve. Es sind von verschiedenen Forschern Formeln für die Beziehung zwischen der Intensität der Magnetisierung und der magnetisierenden Kraft aufgestellt worden, welche indessen nur innerhalb gewisser Grenzen mit der Erfahrung übereinstimmen. Man kann den Verlauf der Stärke der Magnetisierung von Eisen in Abhängigkeit von der magnetisierenden Kraft graphisch darstellen. Erfolgt z. B. die Magnetisierung durch eine stromdurchflossene Spirale, und stellt man die Stärke des magnetisierenden Stromes als Abscisse und die durch ihn hervorgerufene Stärke der Magnetisierung von weichem Eisen als Ordinate eines rechtwinkeligen Koordinatensystems dar, so erhält man eine Magnetisierungskurve, deren Form von der Natur des Eisens und von der Wahl der Einheiten für die Stromstärke und die Intensität der Magnetisierung abhängig ist, deren Charakter aber im allgemeinen durch Abb. 630 dargestellt wird. Die Kurve steigt anfänglich bei schwachen magnetisierenden Kräften langsam, dann bei wachsender magnetisierender Kraft steil in die Höhe bis zu einem Wendepunkte A, um dann in sanfter Steigung zu verlaufen. Wie sehr man auch die magnetisierende Kraft steigern mag, es gibt eine Sättigungsgrenze für die Magnetisierung, welche niemals überschritten werden kann. Sehr bemerkenswert ist der Verlauf der Kurve bei abnehmender magnetisierender Kraft. Wenn letztere bereits auf Null herabgesunken ist, zeigt die im Eisen noch enthaltene Stärke der Magnetisierung eine beträchtliche Größe, welche remanenter Magnetismus genannt wird und durch die Ordinate o C dargestellt wird. Wird die Richtung der magnetisierenden Kraft umgekehrt, so nimmt der remanente Magnetismus rasch ab, und die Kraft o D, welche nötig ist, um ihn zum Verschwinden zu bringen, bietet ein Maß für die Stärke des remanenten Magnetismus und ist zweckmäßig Koercitivkraft genannt worden.



630. Magnetisierungskurve.

Der Verlauf der Magnetisierungskurve zeigt, daß bei abnehmender magnetisierender Kraft die Abnahme des Magnetismus im Eisen weit geringer ist, als die Zunahme des Magnetismus bei entsprechender aufsteigender magnetisierender Kraft war, daß also das Eisen das Bestreben hat, in dem einmal durch die Magnetisierung erlangten magnetischen Zustande zu verharren und der Änderung desselben einen Widerstand entgegenzusetzen. Läßt man, nachdem der remanente Magnetismus zum Verschwinden gebracht ist, die magnetisierende Kraft von neuem von Null an anwachsen, so zeigt das Eisen wieder ein Widerstreben gegen jede Änderung seines Zustandes; die Änderungen des Magnetismus bleiben hinter den Änderungen der magnetisierenden Kraft zurück. Man hat für diese Erscheinung, eine Art magnetischen Beharrungsvermögens, welche sich nicht nur bei weichem Eisen, sondern auch bei Stahl, bei Nickel und bei Kobalt zeigt, den Namen magnetische Hysteresis (von ὑστερέω zurückbleiben) eingeführt. Die Erscheinungen der Hysteresis sind zuerst von dem deutschen Physiker Warburg, dann von den Engländern Hopkinson, Ewing u. a. untersucht worden und sind nicht nur von großem wissenschaftlichen Interesse, sondern haben sich in neuerer Zeit von hervorragender Bedeutung für die Technik erwiesen.

Einfluß der Temperatur auf den Magnetismus. Die Temperatur ist von großem Einflusse auf den magnetischen Zustand der Körper, und zwar nimmt der Mag-

netismus mit wachsender Temperatur ab. Man versteht unter Temperaturkoeffizient eines Magnets die infolge einer Temperaturerhöhung von 1° C. bewirkte Abnahme des magnetischen Moments dividiert durch das magnetische Moment. Im allgemeinen ist der Temperaturkoeffizient um so kleiner, je größer der spezifische Magnetismus ist; sein Wert schwankt zwischen 0,0003 und 0,001. Erhitzt man einen weichen Eisendraht in einer Bunsenflamme bis zur Rotglut, so wird er von einem starken, in seine Nähe gebrachten Magnet nicht angezogen. Bei der Abkühlung des Eisendrahtes tritt sofort wieder Anziehung ein. Für jeden magnetischen Körper gibt es, wie Hopkinson gezeigt hat, eine kritische Temperatur, bei welcher der betreffende, vorher magnetische Körper vollkommen unmagnetisch wird und eine Strukturänderung erleidet; beim gewöhnlichen Eisen liegt die kritische Temperatur zwischen den Grenzen 690 und 870° C.

Erdmagnetismus.

Die Erde ein Magnet. — Die drei erdmagnetischen Elemente: Inklination, Deklination, Horizontale Intensität des Erdmagnetismus. — Methoden der Bestimmung der drei erdmagnetischen Elemente. — Absolutes Maßsystem. — Gaußsche Schwingungs- und Ablenkungsbeobachtung. — Vergleichung magnetischer Momente. — Variationen der erdmagnetischen Elemente. — Das Nordlicht und sein Einfluß auf die erdmagnetischen Elemente.

Wir haben schon erwähnt, daß die Ursache der Richtkraft der Magnetnadel darin zu suchen ist, daß die Erde selbst als ein großer Magnet anzusehen ist, dessen Pole in der Nähe des geographischen Nord-, resp. Südpols liegen.

Die Bestimmung des magnetischen Zustandes der Erde bildet eine der wichtigsten Aufgaben der kosmischen Physik. Alexander von Humboldt hat sich um die Begründung dieses Wissenszweiges unsterbliche Verdienste erworben. Seiner kräftigen Anregung ist es, wie bereits erwähnt, zu danken, daß über den ganzen Erdraum ein Netz von meteorologischen Stationen gezogen worden ist, in denen systematisch, nach einem gemeinsamen Plane zu festgesetzten Stunden die Veränderungen nicht nur des Luftdrucks, des Feuchtigkeitsgehalts, der Temperatur, der Windrichtung u. s. w., sondern auch des magnetischen Verhaltens unseres Planeten, gemessen und verzeichnet werden, so daß man im stande ist, durch Vereinigung der vereinzelt gemachten Beobachtungen ein genaues, anschauliches Bild des allgemeinen Zustandes der Erde, soweit er von diesen Kraftäußerungen abhängig ist, sich zu bilden. Und wenn Humboldt die allgemeine Aufmerksamkeit und thatkräftige Unterstützung diesem wichtigen Gegenstande zuwandte, so haben andere Forscher durch Erfindung ausgezeichneter Methoden der Beobachtung und durch Diskussion der so erhaltenen Resultate die junge Wissenschaft des Erdmagnetismus auf das glänzendste bereichert. Namentlich sind es Karl Friedrich Gauß und Wilhelm Weber, das glänzende Doppelgestirn Göttingens, deren geniale Beobachtungsmethoden, überall angewandt, zum Ausbau eines der wichtigsten Teile der Naturlehre das Wesentlichste beigetragen haben. Durch die von ihnen erfundenen Mittel ist es möglich geworden, den geheimnisvollen Wandlungen jener Naturkraft nachzuspüren und deren Äußerungen zu erkennen, auch wenn sie weit von uns entfernt stattfinden.

Magnetische Inklination. Die Erde selbst ist also als ein großer Magnet, und ein nicht zu ausgedehnter, von Eisenteilen freier Raum an der Erdoberfläche als ein durch den Erdmagnetismus hervorgebrachtes, homogenes magnetisches Kraftfeld aufzufassen. Die Richtung der Kraftlinien ist an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche verschieden, in der Nähe des Äquators ist sie beinahe horizontal, in der Nähe der Pole nahezu lotrecht; ihre Neigung an irgend einem Punkte gegen die Horizontalebene heißt magnetische Inklination dieses Punkts und wird durch eine in ihrem Schwerpunkte aufgehängte, nach allen Richtungen hin frei bewegliche Magnetnadel, wenn sie in Ruhe ist, angezeigt. In der nördlichen Hemisphäre ist der Nordpol der Magnetnadel abwärts, in der südlichen aufwärts gerichtet.

Magnetische Deklination. Die Vertikalebene, welche man sich durch die Achse einer in ihrem Schwerpunkte aufgehängten, frei beweglichen Magnetnadel, wenn dieselbe sich in ihrer Gleichgewichtslage befindet, gelegt denken kann, heißt der magnetische Meridian

Fernrohr derart auf den Magnet eingestellt, daß seine Achse mit derjenigen des Magnets zusammenfällt. Um diese Einstellung zu ermöglichen, ist der Magnet mit einer eigentümlichen Visiervorrichtung versehen; hierauf wird der Magnet um seine Achse um 180° gedreht und die Fernrohreinstellung wiederholt. Ist α_1 der Mittelwert der den beiden Einstellungen entsprechenden Winkelablesungen, so ergibt sich die Deklination $\delta' = \alpha - \alpha_1$. Dieser Ausdruck bedarf indessen noch einer von der Torsion des Aufhängefadens herrührenden kleinen Korrektion.

Beschreibung eines magnetischen Theodolits. Eine sehr zweckmäßige und kompendiöse Form des magnetischen Theodolits, welcher zur Bestimmung sowohl der

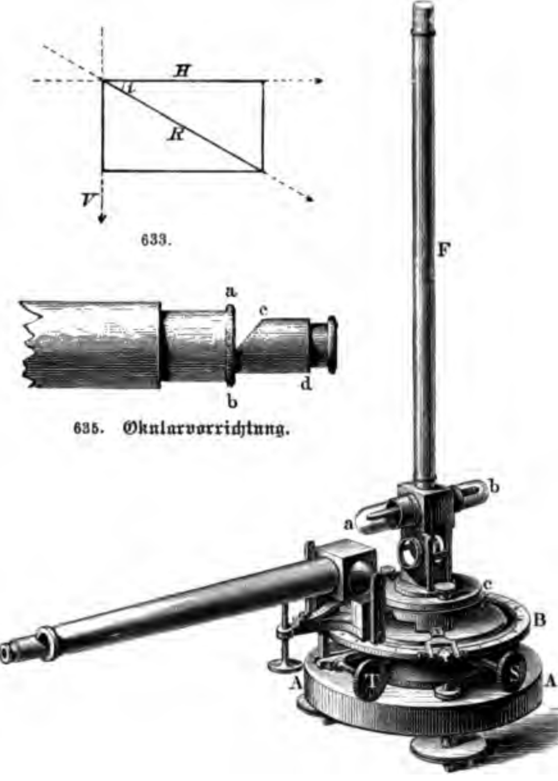


682. Karl Friedrich Gauß.

erdmagnetischen Deklination wie der Horizontalintensität dient, ist von Lamont konstruiert worden.

Die Einrichtung desselben ist folgende: Mit der durch drei Stellschrauben horizontierbaren Grundplatte A A ist die mit einer feinen Kreisteilung versehene Scheibe B fest verbunden. Durch die Mitte der Platte A A und der Scheibe B geht eine vertikale Achse, welche die Scheibe c trägt. Letztere ist in ihrer Ebene um die vertikale Achse drehbar, und die Größe der Drehung kann mittels zweier, an ihr befestigten Nonien an dem Teilkreise abgelesen werden. Der Fernrohrträger wird durch die horizontale Verlängerung der Scheibe c gebildet; ihre Feststellung erfolgt durch die Druckschraube S, die feinere Einstellung mittels der Mikrometerschraube T. Auf die Scheibe c ist das Magnetgehäuse aufgesetzt. Der am oberen Ende der Suspensionsröhre F mittels eines

Kokonfadens aufgehängte Magnet schwingt innerhalb des durch zwei Glasröhren a und b verschlossenen Raums und trägt unterhalb den Spiegel, dessen Ebene genau senkrecht zur magnetischen Achse einzustellen ist. Das den Spiegel umgebende Gehäuse ist an der dem Fernrohre zugewandten Seite mit einer Spiegelglasplatte verschlossen. Die Normale zum Spiegel würde die Richtung des magnetischen Meridians angeben, und die Achse des Fernrohrs kann mittels einer eigentümlichen, von Gauß angegebenen Okularvorrichtung (Abb. 635) genau normal zur Spiegelebene eingestellt werden. Zu diesem Zwecke ist das Okularrohr des Fernrohrs in der Bildebene a b des Objektivs durch eine Glasplatte verschlossen, in welche ein feines Fadenkreuz eingeritzt ist. Die Hülse c d des Okulars hat einen unter einem Winkel von 45° bis zu ihrer Mitte reichenden Einschnitt, in welchen eine Spiegelplatte eingesetzt ist, behufs seitlicher Beleuchtung des Fadenkreuzes. Die Achse des Fernrohrs wird normal zur Spiegelebene stehen, wenn das durch das Okular direkt gesehene (seitlich beleuchtete) Fadenkreuz mit dem von dem Spiegel reflektierten Bilde desselben genau koinzidiert.



633.

635. Okularvorrichtung.

634. Magnetischer Theodolit.

Eine einfachere und ebenso zweckmäßige Form des Magnets, bei welcher die direkte Einstellung des Fernrohrs auf die magnetische Achse ohne Anwendung der Spiegelvorrichtung ausgeführt werden kann, ist die, daß der Magnet hohl und an seinem hinteren Ende mit einem zur Achse senkrechten Glasmikrometer oder einem vertikal durch die Mitte des Magnets gehenden Spinnewebfaden versehen ist, während das vordere, dem Fernrohr zugewandte Ende durch eine kleine Konvexlinse verschlossen ist, deren Brennweite gleich der Länge des Magnets ist, so daß die Teilstriche des Glasmikrometers, oder der Spinnewebfaden, durch das Fernrohr gesehen, als unendlich ferne Objekte, also scharf erscheinen, wenn das Fernrohr vorher auf einen unendlich fernen Gegenstand (zur Bestimmung des astronomischen Meridians auf die Sonne) eingestellt worden ist.

Zur Bestimmung des astronomischen Meridians kann das Magnetgehäuse vom Theodolit abgehoben, und das Fernrohr in der vorhin angegebenen Weise zur Beobachtung des Moments der Kulmination der Sonne, resp. zur Beobachtung korrespondierender Sonnenhöhen angewandt werden.

Die magnetische Deklination für einen und denselben Ort ist säkularen, jährlichen und täglichen Schwankungen unterworfen. Im Jahre 1580 betrug sie zu Paris, wo die ältesten, regelmäßigen erdmagnetischen Beobachtungen ausgeführt sind, 11° 30′ östlich, im Jahre 1663 Null, im Jahre 1814 erreichte sie ein Maximum westlich 22° 34′ und geht seitdem langsam nach Osten zurück. Die jährlichen Schwankungen übersteigen kaum 15 Minuten, die täglichen schwanken zwischen 5 und 25 Minuten. In unseren Gegenden hat die Deklinationsnadel morgens gegen 8 Uhr ihre östlichste Ausweichung, dann geht das Nordende nach Westen, zwischen 1 und 2 Uhr nachmittags kehrt sie wieder um und geht

in den Tages- und Abendstunden rascher als in den Nachtstunden wieder zu ihrer ursprünglichen Ruhelage zurück. Außerdem treten ab und zu plötzliche, kurz andauernde Schwankungen auf, infolge magnetischer Ungewitter. Die Deklination ist verschieden für verschiedene Orte, an den beiden geographischen Polen ist sie Null. Die Verbindungslinien der Orte, welche gleiche Deklination besitzen, heißen Isogonen, die Verbindungslinie der Orte, deren Deklination Null ist, heißt Agone.

Für Berlin ist gegenwärtig die magnetische Deklination 9,5° westlich, und nimmt pro Jahr etwa um 6 Minuten ab. Die Richtung der großen Friedrichstraße zu Berlin fiel zur Zeit ihrer Erbauung genau mit dem magnetischen Meridian zusammen; so kann die Bussole gewissermaßen ein chronologisches Moment bilden.

Die Beobachtung der Deklination finden wir zum erstenmal in den Schiffsbüchern des Christoph Kolumbus verzeichnet, welche derselbe auf seiner Entdeckungsfahrt 1492 führte. Unter dem 13. September heißt es darin: „Beim Anbruch der Nacht zeigte der Kompaß eine Abweichung gegen Nordwesten, am Morgen war die Abweichung ein wenig geringer.“ Den Grund der Erscheinung aber suchte der kühne Seefahrer nicht in den magnetischen Verhältnissen der Erde, über deren Natur man zu seiner Zeit sehr mangelhafte Vorstellungen hatte, sondern in dem Umstande, daß der Polarstern nicht den astronomischen Pol genau anzeigt, sondern eine Kreisbewegung macht, welcher die Magnetnadel nicht folge, und mit dieser Erklärung beruhigte er das Schiffsvolk, welches die wiederholt sich zeigende Erscheinung mit Angst aufnahm. Erst auf dem Rückwege aus Westindien sah Kolumbus seinen Irrtum ein und erkannte, daß es im Atlantischen Meere eine Linie gebe, nach deren Überschreitung die Magnetnadel eine Ablenkung von ihrer Nordrichtung zeigte.

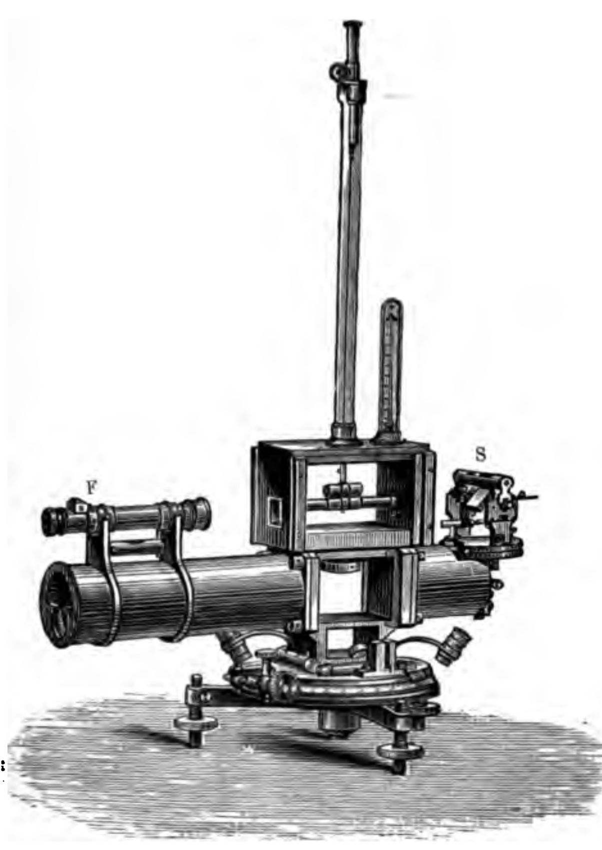


636. Inklinatorium.

Beschreibung eines Inklinatoriums. Abb. 636 stellt ein zweckmäßig konstruiertes Inklinatorium dar. Der mit einer feinen Gradteilung versehene Vertikalkreis, innerhalb dessen die Inklinationsnadel ihre Schwingungen ausführt, ist behufs Einstellung in den magnetischen Meridian mittels Druck- und Mikrometerschraube um die vertikale Achse drehbar, welche durch den Mittelpunkt des durch drei Stellschrauben nivellierbaren, geteilten Horizontalkreises geht. Auf der Mitte der Alhidade ist ein Bogenstück B befestigt, welches die beiden horizontalen Querleisten F trägt, in deren Mitte die Achatlager für die Inklinationsnadel angebracht sind. Die oberen Kanten der Lager liegen in einer dem Zentrum des Kreises entsprechenden Horizontalebene. Durch die Mitte der vertikal stehenden Platte p geht eine Horizontalachse, um welche der nach innen liegende Kreis drehbar ist. Mit dem Vertikalkreis fest verbunden ist eine Alhidade mit den beiden konkaven Spiegeln M und M_1, welche zur genauen Einstellung der Nadelspitzen dienen. l und l_1 sind zwei mit der Hand zu bewegende Ableselupen. Die Inklinationsnadel ist mit einer durch ihren Schwerpunkt gehenden, zu ihrer Ebene senkrecht stehenden Stahlachse versehen, welche mittels der Hebevorrichtung H auf die Achatlager aufgesetzt und von ihnen abgehoben werden kann. Vertikalkreis und Inklinationsnadel können durch ein Glasgehäuse vor Luftströmungen geschützt werden. Die außerhalb des Gehäuses mit dem

Vertikalkreis fest verbundene Scheibe V dient zur rohen, die Mikrometerschraube s zur feineren Einstellung des Vertikalkreises. Die beiden Spiegel M und M_1 sind so zu justieren, daß, wenn der Nullpunkt des Vertikalkreises und der Nullpunkt des Nonius zusammenfallen, die Verbindungslinie der beiden Spiegelmittelpunkte genau vertikal steht, was mit Hilfe eines am obersten Teile des Gehäuses angebrachten Lotes und der beiden Ablelupen kontrolliert werden kann.

Bestimmung der magnetischen Inklination. Nach sorgfältiger Horizontierung des Inklinatoriums wird der Vertikalkreis durch Drehung um die Drehungsachse in den vorher festgelegten magnetischen Meridian gebracht. Ist die Lage des letzteren noch nicht vorher bekannt, so kann man sie mit Hilfe des Inklinatoriums selbst auffinden, indem man durch Drehen des Vertikalkreises diejenige Stellung aufsucht, in welcher die Inklinationsnadel genau vertikal steht, in welcher also nur die vertikale Komponente der erdmagnetischen Kraft zur Wirkung kommt, während der horizontale Anteil Null ist. Liest man diese Stellung auf dem Horizontalkreise ab und dreht dann den Vertikalkreis um 90°, so befindet er sich im magnetischen Meridian. Nunmehr wird die Gleichgewichtslage der Inklinationsnadel ermittelt; als Mittel aus den an beiden Spitzen gemachten Ablesungen ergebe sich für die Inklination der Winkel i_1. Um den schädlichen Einfluß einer seitlichen Exzentrizität des Schwerpunktes der Magnetnadel sowie der Abweichung des Nullstriches von der Horizontalen oder des 90°-Striches von der Vertikalen zu eliminieren, wird der Vertikalkreis um 180° gedreht und von neuem die Gleichgewichtslage der Magnetnadel bestimmt; wird jetzt der Winkel i_2 (stets als Mittel aus den Ablesungen an beiden Spitzen) abgelesen, so ist die magnetische Inklination $i = \frac{i_1 + i_2}{2}$.



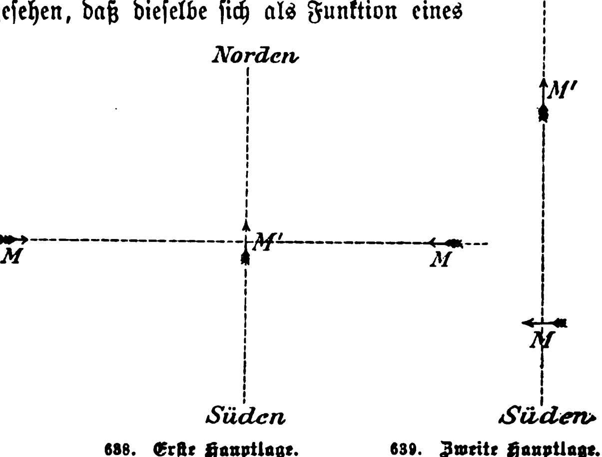
687. Magnetometer.

Auch die Inklination hat nicht nur von Ort zu Ort verschiedene Werte, sondern ändert auch für einen und denselben Ort beständig ihren Wert. Im Jahre 1661 betrug sie zu Paris 75° und hat seitdem beständig abgenommen, so daß ihr Wert daselbst im Jahre 1870 nur noch 65° 19′ war und gegenwärtig 64° 54′ beträgt. Den größten Wert besitzt sie in den Polarregionen, den kleinsten in der Nähe des Äquators. Die Verbindungslinie derjenigen Punkte der Erdoberfläche, für welche die Inklination Null ist, heißt magnetischer Äquator; die Linien, welche Orte von gleicher magnetischer Inklination verbinden, heißen Isoklinen.

Für Berlin ist gegenwärtig die magnetische Inklination 65° 58′ und nimmt pro Jahr etwa um 1 Minute ab.

Bestimmung der horizontalen Intensität des Erdmagnetismus. Das wichtigste erdmagnetische Element ist die Intensität des Erdmagnetismus, und zwar die

Horizontalintensität, welche allein bei der Mehrzahl der magnetischen und elektrischen Meßinstrumente in Wirkung tritt, und welche man nur durch den Cosinus der Inklination zu dividieren hat, um die Gesamtintensität zu erhalten. Ihre Bestimmung ist deshalb von so großer Bedeutung, weil sie die wissenschaftliche Grundlage des absoluten Maßsystems und somit auch die Grundlage des aus demselben abgeleiteten und in der Elektrotechnik allgemein angewandten praktischen Maßsystems ist. Karl Friedrich **Gauß** hat zuerst im Jahre 1833 in seiner berühmten Abhandlung „Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata" gezeigt, in welcher Weise alle magnetischen Größen in absolutem Maße, d. h. durch die drei Fundamentaleinheiten der Masse, der Länge und der Zeit darzustellen sind, und seine Methode ist später (1852) von seinem Mitarbeiter Wilhelm **Weber** auch auf die Messung elektrischer Größen übertragen worden. Eine Geschwindigkeit läßt sich z. B., wie im ersten Teile dieses Buches aus einander gesetzt ist, darstellen als Quotient aus Länge und Zeit, eine Beschleunigung als Quotient aus Geschwindigkeit und Zeit, eine Kraft als Produkt aus Masse und Beschleunigung, kurz, alle physikalischen Größen lassen sich durch die drei Fundamentaleinheiten Zentimeter, Gramm, Sekunde darstellen, und man nennt die Funktion, welche das Abhängigkeitsverhältnis einer physikalischen Größe von den drei Fundamentaleinheiten ausdrückt, die **Dimension** der physikalischen Größe. Wir haben bei der Definition der Einheit der Menge von Magnetismus gesehen, daß dieselbe sich als Funktion eines Gewichts, d. h. also einer Kraft und einer Länge, also in Zentimeter, Gramm und Sekunde ausdrücken läßt, und Gauß hat dieses zuerst für die Intensität des Erdmagnetismus und für alle magnetischen Größen ausgeführt. Der Definition gemäß wird die Intensität an irgend einer Stelle gemessen durch die magnetische Wirkung, die daselbst auf einen Magnetpol von der Stärke Eins ausgeübt wird. Direkt läßt sich nun nicht die Horizontalintensität H bestimmen, sondern nur indirekt, indem man einmal das Produkt aus Horizontalintensität H und magnetischem Moment M und dann den Quotienten aus Horizontalintensität H und magnetischem Moment M bestimmt und so zwei Gleichungen erhält, aus denen sich H und M gesondert ermitteln lassen. Demgemäß zerfällt die von Gauß angegebene geniale Messungsmethode in zwei Teile, in die **Schwingungsbeobachtung**, durch welche das Produkt M H aus magnetischem Moment eines Magnets und Horizontalintensität, und in die **Ablenkungsbeobachtung**, durch welche der Quotient dieser beiden Größen $\frac{M}{H}$ bestimmt wird.

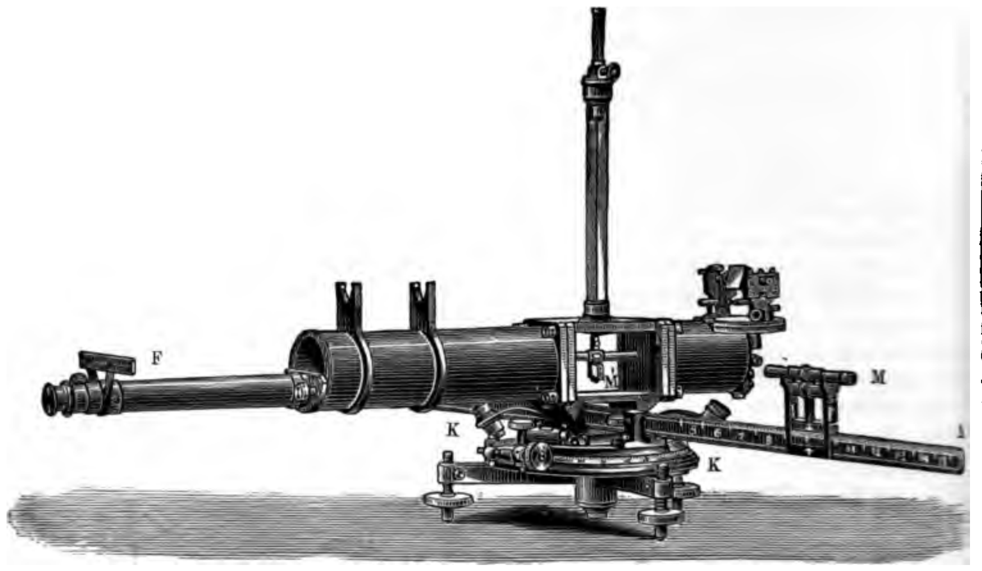


688. Erste Hauptlage. 689. Zweite Hauptlage.

Was zunächst die Bestimmung des Produkts M H anbelangt, so beobachtet man mittels eines Chronometers oder mittels des auf S. 231 bis 232 beschriebenen Chronoskops die Schwingungsdauer eines passend geformten Magnets, d. h. also das Zeitintervall, welches verfließt zwischen zwei unmittelbar auf einander folgenden Durchgängen durch die Gleichgewichtslage des Magnets. Man bedient sich hierzu eines Magnetometers, wie es z. B. durch Abb. 637 dargestellt ist, bei welchem der an einem feinen Kokonfaden aufgehängte Magnet hohl ist und an seinem hinteren Ende eine photographische Skale, an dem vorderen Ende eine achromatische Linse enthält, deren Brennweite gleich der Länge des Magnets ist. Diese Skale wird durch einen seitlich am Instrument angebrachten, mikrometrisch einstellbaren Spiegel S beleuchtet und erscheint deshalb im Gesichtsfelde des in

Lagern ruhenden, dem Magnet gegenüber liegenden Fernrohrs F hell auf dunklem Grunde. Die Schwingungen eines Magnets erfolgen nun nach denselben Gesetzen, welche für das physische Pendel gelten, und welche im ersten Teile dieses Buches ihre Behandlung gefunden haben. Ist also die Schwingungsdauer des Magnets beobachtet und sein Trägheitsmoment bekannt, so läßt sich mittels einer einfachen, der Pendelgleichung ähnlichen Beziehung das (magnetische) Drehungsmoment MH bestimmen. Da das Trägheitsmoment als das Produkt einer Masse in das Quadrat einer Länge durch Gramm und Zentimeter darstellbar ist, ferner die beobachtete Schwingungsdauer in Sekunden und Bruchteilen derselben ausgedrückt wird, so erhalten wir auch das Produkt MH in absolutem Maße, d. h. in Gramm, Zentimeter und Sekunde ausgedrückt.

Was zweitens die Bestimmung des Quotienten $\frac{M}{H}$ anbelangt, so wird derselbe gemessen durch die Größe des Winkels, um welchen ein in seinem Schwerpunkte aufgehängter, um die vertikale Achse schwingender Hilfsmagnet M' aus dem magnetischen Meridian durch den für die Schwingungsbeobachtung benutzten Magnet M abgelenkt wird.



640. Apparat für Ablenkungsbeobachtungen.

Die Größe der Ablenkung wird offenbar abhängen von der Entfernung, aus welcher der ablenkende Magnet wirkt, und da auf den Hilfsmagnet zwei Kräfte wirken — nämlich die Kraft des Erdmagnetismus (die ihn in den magnetischen Meridian zu bringen strebt) und die ablenkende Kraft des Magnets (die ihn aus dem Meridian zu treiben strebt) — von dem Verhältnisse dieser beiden Kräfte. Man unterscheidet nach Gauß zwei Fälle: die erste Hauptlage (Abb. 638), in welcher der ablenkende Magnet M sich östlich oder westlich vom Hilfsmagnet M' befindet und zwar so, daß seine Achse senkrecht und symmetrisch zur Achse des Hilfsmagnets und in gleicher Höhe mit ihr liegt, und die zweite Hauptlage (Abb. 639), in welcher der ablenkende Magnet M nördlich oder südlich, sonst aber in gleicher Weise wie vorhin in Bezug auf den Hilfsmagnet M' liegt.

Ein Apparat für die Ablenkungsbeobachtungen ist in Abb. 640 dargestellt. Seine Einrichtung ist fast dieselbe wie die des Magnetometers (Abb. 637). Der Hilfsmagnet M' ist wieder an einem feinen Kokonfaden aufgehängt, seine Ruhelage und Ablenkung wird mittels des Fernrohrs F und der Gauß-Poggendorffschen Spiegelablesungsvorrichtung beobachtet und an dem geteilten Kreise K abgelesen. Die Ablenkung erfolgt in der ersten Hauptlage durch den Magnet M; die Entfernung r seiner Mitte von derjenigen des Hilfsmagnets M' kann auf der geteilten Schiene A abgelesen werden. Aus dem Winkel, um

welchen M' von M bei einer bestimmten Entfernung aus dem magnetischen Meridian abgelenkt wird, ergibt sich das Verhältnis $\frac{M}{H}$. Um eine etwaige unsymmetrische Magnetisierung von M und M' zu eliminieren, beobachtet man die Ablenkungswinkel, wenn M in der östlichen Lage sowohl, wie in der westlichen, in derselben Entfernung einmal seinen Nordpol, das andere Mal seinen Südpol dem Hilfsmagnet M' zuwendet.

Da durch die Schwingungsbeobachtung das Produkt M H und durch die Ablenkungsbeobachtung das Verhältnis $\frac{M}{H}$ gefunden ist, so erhält man demnach sowohl das magnetische Moment des Magnets als auch die Horizontalintensität in absolutem Maße bestimmt.

Die Gaußsche Methode kann natürlich auch angewandt werden, um die magnetischen Momente verschiedener Magnete mit einander zu vergleichen. Man braucht diese nur aus einer und derselben Entfernung auf denselben Hilfsmagnet einwirken zu lassen und die jedesmaligen Ablenkungswinkel zu beobachten. Die magnetischen Momente verhalten sich dann wie die Tangenten der Ablenkungswinkel.



641. Kane, das Magnetometer beobachtend.

Dividiert man das auf diese Weise in absolutem Maße ausgedrückte magnetische Moment eines Magnets durch seinen Polabstand, so erhält man auch die Stärke des magnetischen Pols in absolutem Maße ausgedrückt. Und dividiert man endlich die Polstärke durch die Polfläche, ausgedrückt in Quadratzentimeter, so erhält man die Anzahl der durch die Flächeneinheit hindurchgehenden Kraftlinien. So zeigt sich die Gaußsche Messungsmethode von fundamentaler Bedeutung für die Bestimmung der magnetischen Größen.

Auch die Intensität des Erdmagnetismus hat an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche verschiedene Werte; sie nimmt im allgemeinen vom Äquator nach den Polen hin zu. Die Kurven, welche Orte von gleicher magnetischer Intensität verbinden, heißen Isodynamen. Ferner ist die Intensität, ebenso wie die anderen magnetischen Elemente, für einen und denselben Ort nicht konstant, sondern gewissen, teils regelmäßigen, teils zufälligen Schwankungen unterworfen. Für Berlin beträgt die magnetische Horizontalintensität gegenwärtig 0,187 C. G. S.-Einheiten, d. h. also die horizontale Komponente der Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus in Berlin auf den Magnetpol Eins wirkt, hat die Größe von 0,187 Dynen oder abgerundet 0,2 Milligramm. Die Gesamtintensität des Erdmagnetismus beträgt für Berlin 0,46 absolute Einheiten.

Ursache der erdmagnetischen Variationen. Das Nordlicht und seine Beziehungen zum Erdmagnetismus. Die Schwankungen der erdmagnetischen Elemente stehen offenbar in engem, wenn auch bisher nicht aufgeklärtem Zusammenhang mit den Änderungen der Licht-, Wärme- und Elektrizitätserscheinungen auf unserer Erde. Diese

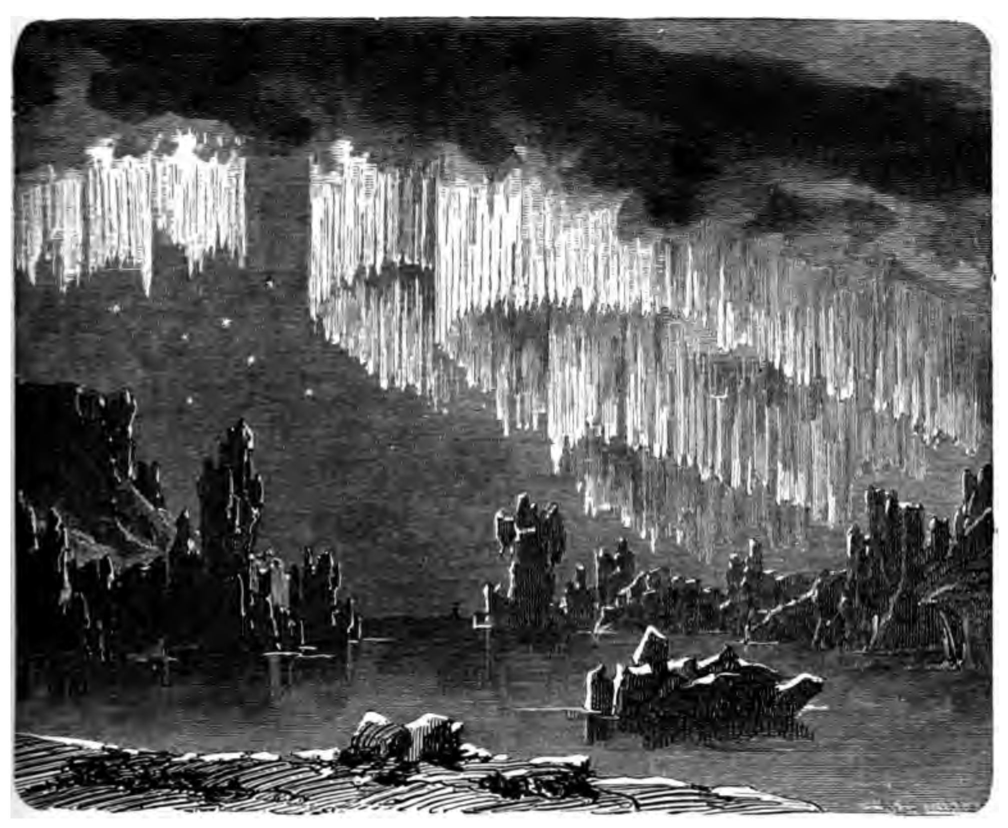
Variationen zu beobachten und durch auf lange Zeiträume ausgedehnte Vergleichungen den gesetzmäßigen Zusammenhang zu ergründen, ist der Zweck der umfangreichen Arbeiten, die in systematischer Weise in verschiedenen Laboratorien der Universitäten, in magnetischen Observatorien Europas und aller anderen Erdteile, in Indien und in den Steppen Chinas, auf den Inseln der Südsee, wie in Grönland, am Kap der guten Hoffnung auf die Beobachtung der zuckenden Magnetnadel verwandt werden. Der Weltreisende zählt das Magnetometer zu seinen wichtigsten Apparaten, seitdem Alexander von Humboldt auf den Kordilleren Südamerikas sowie in der leicht gezimmerten Hütte in den sumpfigen Urwäldern des Amazonenstroms und Kane im hohen Norden, in den arktischen Regionen, durch ihre magnetischen Beobachtungen der kosmischen Physik die wichtigsten Dienste geleistet haben.

Abgesehen von den periodischen, täglichen magnetischen Variationen zeigt die Magnetnadel häufig plötzliche Schwankungen und erfährt nicht nur vorübergehende, sondern auch permanente Ablenkungen, welche bisweilen die Größe eines Grades erreichen und übersteigen, z. B. durch Erderschütterungen und durch vulkanische Eruptionen. Von allen magnetischen Störungen sind aber diejenigen am stärksten, welche sich zeigen, sobald ein Nordlicht (aurora borealis) am Himmel erscheint, jene wunderbare und prachtvolle Naturerscheinung, die in ihrem vollen Glanze in den Gegenden jenseit des nördlichen Polarkreises auftritt, in denen die Sonne um die Zeit des Wintersolstitiums Wochen und Monate unter dem Horizonte bleibt. Sobald ein Nordlicht erglänzt und auch schon vorher gerät die Magnetnadel in merkwürdige, beständige Zuckungen und erfährt eine beträchtliche Ablenkung, die dadurch charakteristisch ist, daß der Nordpol der Deklinationsnadel vorzugsweise nach Westen abgelenkt wird; und zwar werden diese Zuckungen und Ablenkungen nicht nur an Orten beobachtet, an denen das Nordlicht sichtbar ist, sondern auch an weit entfernten, an denen man nichts von jenem Phänomen wahrnimmt. Je näher man aber dem letzteren ist, und je intensiver es auftritt, um so stärker sind die magnetischen Einwirkungen desselben. Am deutlichsten für den innigen Zusammenhang mit dem Erdmagnetismus spricht die Thatsache, daß die Richtung der Nordlichtstrahlen mit der Richtung zusammenfällt, welche eine an ihre Stelle gebrachte, nach allen Seiten frei bewegliche Magnetnadel annehmen würde.

Bei uns erscheinen die Nordlichter ziemlich selten; die letzten sind am 18. Okt. 1836, am 24. und 25. Oktober 1870 und am 4. Februar 1872 beobachtet worden; in den nördlicher gelegenen Gegenden aber erglänzen sie fast allabendlich am Himmel. Auf einer im Jahre 1838 nach Norwegen ausgesandten Expedition beobachtete der Schiffsleutnant Lottin während eines Zeitraums von 206 Tagen nicht weniger als 143 Nordlichter.

„Zwischen 4 und 8 Uhr des Abends färbte sich der obere Teil des lichten Nebels, welcher dort fast immer gegen Norden zu herrscht. Der lichte Streifen nahm allmählich die Gestalt eines Bogens an, dessen Enden sich auf den Horizont stützten. Sein Gipfel blieb in der Richtung des magnetischen Meridians. Bald erscheinen schwärzliche Streifen, welche den lichten Bogen trennen, und so bilden sich Strahlen, welche sich bald rasch, bald langsam verlängern oder verkürzen. Die Strahlen schießen über den Himmel herauf und verlängern sich bisweilen bis zu dem Punkte, welcher durch das Südende der Inklinationsnadel bezeichnet wird, so das Fragment eines ungeheuren Lichtgewölbes bildend. In dem Glanze des nach dem Zenith hin wachsenden Bogens zeigt sich eine wellenförmige Bewegung; der Glanz der Lichtstrahlen wächst der Reihe nach von einem Fuße zum anderen, und es geht dies Wogen des Lichts bald von Westen nach Osten, bald in umgekehrter Richtung. Auch in seiner horizontalen Ausbreitung kommt der Bogen in Bewegung, er wallt und wogt, er entwickelt sich wie ein bewegtes Band oder eine wehende Fahne. Manchmal verläßt einer der Füße oder selbst beide den Horizont, dann werden diese Biegungen zahlreicher und deutlicher. Der Bogen erscheint nun als ein langes Strahlenband, welches sich entwickelt, in mehrere Teile trennt und graziöse Windungen bildet, welche sich fast schließen und das hervorbringen, was man wohl die „Krone“ genannt hat. Alsdann ändert

sich plötzlich die Lichtintensität der Strahlen, sie übertrifft die der Sterne erster Größe; die Strahlen schießen mit Schnelligkeit, bilden Biegungen und entrollen sich wie die Windungen einer Schlange; nun färben sich die Strahlen, die Basis ist rot, die Mitte grün, der übrige Teil behält ein blaßgelbes Licht. Diese Farben behalten immer ihre gegenseitige Lage und haben eine bewundernswürdige Durchsichtigkeit. Das Rot nähert sich einem hellen Blutrot, das Grün einem blassen Smaragdgrün. Da endlich nimmt der Glanz ab, die Farben verschwinden, die ganze Erscheinung erlischt entweder plötzlich, oder sie wird nach und nach schwächer. Einzelne Stücke des Bogens aber treten wieder auf, er bildet sich von neuem, er setzt seine aufsteigende Bewegung fort und nähert sich dem Zenith. Die Strahlen erscheinen durch die Perspektive immer kürzer, alsdann erreicht der Gipfel

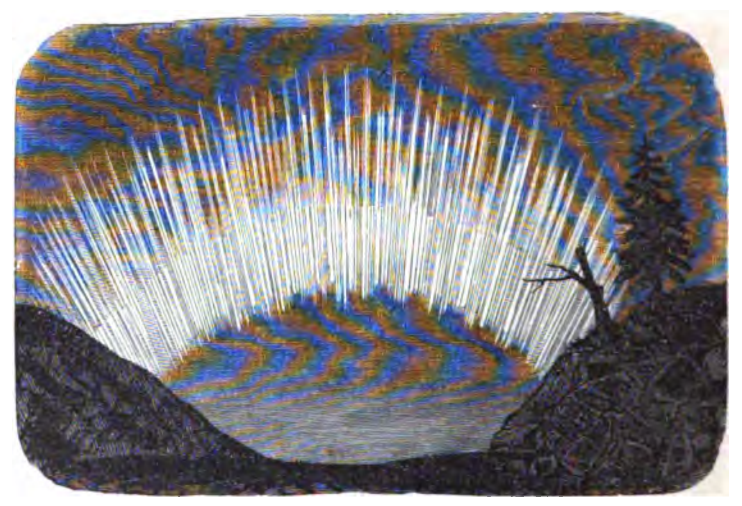


642. Nordlichterscheinung auf dem Eismeer.

des Bogens den magnetischen Zenith, einen Punkt, nach welchem die Südspitze der Inklinationsnadel hinweist. Unterdessen bilden sich neue Bogen am Horizonte; sie folgen einander, indem alle fast dieselben Phasen durchlaufen und in bestimmten Zwischenräumen von einander bleiben. Manchmal werden diese Zwischenräume kleiner, mehrere dieser Bogen drängen einander, sie erinnern durch ihre Anordnung an die Coulissen unserer Theater, die, auf die Seitencoulissen gestützt, den Himmel der Theaterszene bilden. So oft die Strahlen am hohen Himmel den magnetischen Zenith überschritten haben, scheinen sie von Süden her nach diesem Punkte zu konvergieren und bilden alsdann die eigentliche Krone. Die Erscheinung der Krone ist ohne Zweifel nur eine Wirkung der Perspektive, und ein Beobachter, welcher in diesem Augenblick weiter nach Süden sich befindet, wird sicherlich nur einen Bogen sehen können.

„Denkt man sich nun ein lebhaftes Schießen von Strahlen, welche beständig sowohl in Beziehung auf ihre Länge als auf ihren Glanz sich ändern, daß sie die herrlichsten roten und grünen Farbentöne zeigen, daß eine wellenartige Bewegung stattfindet, daß Lichtströme einander folgen und endlich, daß das ganze Himmelsgewölbe eine ungeheure prächtige Lichtkuppel zu sein scheint, welche über einen mit Schnee bedeckten Boden ausgebreitet ist und einen blendenden Rahmen für das ruhige Meer bildet, welches dunkel ist wie ein Asphaltsee, so hat man eine unvollständige Vorstellung von diesem wunderbaren Schauspiele, auf dessen Beschreibung man verzichten muß." So schildert Lottin die zu Bossekop beobachteten Nordlichter. Was wir in unseren Gegenden von dieser Erscheinung wahrnehmen, kann mit dem Glanze, welchen das Phänomen im Norden hat, nicht verglichen werden.

Die spektroskopische Untersuchung der Nordlichter hat ergeben, daß das Spektrum des Lichtbogens vorzugsweise aus einer einzigen hellen, gelbgrünen, zwischen den Fraunhoferschen Linien D und E gelegenen Linie, der sogenannten Nordlichtlinie, besteht, welche Ångström auch im Spektrum des Zodiakallichtes beobachtet hat; sie stimmt mit keiner der uns bekannten Gaslinien überein (vergl. S. 337, Abb. 403).



648. Nordlicht.

Die Grenzen, innerhalb deren ein Nordlicht sichtbar ist, sind oft sehr weit; daraus läßt sich auf die große Höhe, in welcher sich das Phänomen abspielt, ein Schluß ziehen. So wurde z. B. das Nordlicht vom 28. August 1859 auf einer Strecke von 140 Längengraden, von Kalifornien bis Osteuropa und von Jamaika bis in die nördlichsten Gegenden von Britisch-Amerika beobachtet, und aus ähnlichen Beobachtungen hat Mairan die Höhe des Nordlichts auf mehr als 100 geographische Meilen geschätzt.

In dem Auftreten der Polarlichter scheint eine gewisse Periodizität zu herrschen. Abgesehen davon, daß Loomis für Kanada die Stunden gegen 11 Uhr nachts, für höhere Breiten die Zeit um Mitternacht und 1 Uhr morgens als diejenigen Zeiten angibt, zu denen sie am häufigsten erscheinen, haben einige Forscher, namentlich R. Wolf und Fritz, nachzuweisen versucht, daß ein Maximum der Häufigkeit der Nordlichter immer nach Verlauf von elf Jahren wiederkehre. Fünf solcher elfjährigen Perioden sollen Abschnitte bezeichnen, welche durch noch bedeutendere Maxima hervortreten. Es soll hierbei nicht unerwähnt bleiben, daß man auch für die Wiederkehr der Sonnenflecken eine elfjährige Periode und für die der Sternschnuppen (nach Humboldt) eine dreiunddreißigjährige beobachtet zu haben glaubt.

Die Übereinstimmung der Strahlenrichtung mit dem magnetischen Meridian führte, wie bereits erwähnt, schon zeitig auf die Vermutung, daß das Nordlicht mit dem Erdmagnetismus in engem Zusammenhange stehe. Seit man nun auch noch beobachtet hat, daß über dem Himmel des Südpols dieselben wunderbaren Ausstrahlungen von Zeit zu Zeit stattfinden, daß diese Südlichter oft gleichzeitig mit den Nordlichtern auftreten, und beide in unverkennbarer Abhängigkeit von einander stehen; seit man die Einflüsse derselben auf die Magnetnadel oft und so genau beobachtet hat, daß Arago von seinem Zimmer zu Paris, viele Hundert Meilen vom Nordpol entfernt, aus den Bewegungen seiner Nadel das gleichzeitige Aufflammen eines Nordlichts über den nordischen Himmel verkünden konnte, seitdem war man geneigt, diese vielbewunderte und früher vielgefürchtete Naturerscheinung für das zu halten, was sie Humboldt nennt, für ein magnetisches Ungewitter, in welchem die gestörten Verhältnisse durch einen plötzlichen Ausgleich dem Gleichgewichtszustande wieder zustreben.

Nach de la Rive ist das Nordlicht eine Erscheinung atmosphärischer Elektrizität, deren Erklärung wir des Zusammenhangs wegen schon an dieser Stelle bringen wollen, obgleich einige für das Verständnis erforderlichen Begriffe erst in der Elektrizitätslehre ihre Besprechung finden werden:

Durch die Dämpfe, welche von dem mit positiver Elektrizität geladenen Meerwasser aufsteigen, wird die positive Elektrizität in die höheren Regionen der Atmosphäre und durch den rückkehrenden Passat den Polen zugeführt, während die Erde selbst mit negativer Elektrizität geladen bleibt. Die gut leitende verdünnte Luft der höheren Regionen und die gleichfalls gut leitende Erde bilden so gewissermaßen die beiden Belegungen eines Kondensators, dessen isolierende Schicht durch die unteren Regionen der Atmosphäre gebildet wird. Dort wo die positive Luftschicht der negativen Erdoberfläche am nächsten ist, also in der Nähe der Pole, werden sich nun die entgegengesetzten Elektrizitäten vorzugsweise verdichten, und wenn eine gewisse Spannung erreicht ist, wird eine Ausgleichung in Form von Entladungen, und zwar nahezu gleichzeitig an beiden Polen, erfolgen müssen. Infolge dieser Entladungen muß auf der Erde die positive Elektrizität von den Polen zum Äquator und die negative in umgekehrter Richtung strömen, und infolge dieses elektrischen Stroms muß auf der nördlichen Hemisphäre der Nordpol der Deklinationsnadel nach Westen abgelenkt werden. Thatsächlich findet die magnetische Ablenkung, wie oben erwähnt, in diesem Sinne statt, auch läßt sich die bezeichnete Richtung jenes durch das Nordlicht hervorgerufenen Erdstroms in den Drahtleitungen zweier nördlich gegen einander gelegenen Telegraphenstationen nachweisen. De la Rive hat einen Apparat konstruiert, welcher eine Nachbildung der das Nordlicht begleitenden Erscheinungen ermöglicht. Die de la Rivesche Nordlichttheorie ist nicht einwurfsfrei. In neuerer Zeit (Mitte der achtziger Jahre) ist es Lemström gelungen, die Erscheinungen des Nordlichts künstlich nachzubilden und seinen elektrischen Ursprung nachzuweisen, indem er auf hohen Berggipfeln ein System isolierter, aber mit einander leitend verbundener Ausströmungsspitzen aufstellte und von ihnen eine isolierte Leitung thalabwärts und nach Einschaltung eines Galvanometers zur Erde führte. Es flammten über den Ausströmungsspitzen gelblich-weiße Lichtsäulen bis zu einer Höhe von etwa 120 m auf, welche, spektroskopisch untersucht, die charakteristische Nordlinie zeigten; zu gleicher Zeit waren elektrische Ströme nachweisbar, deren positive Richtung von der Atmosphäre zur Erde ging. Wenn auch eine in allen Punkten erschöpfende Theorie des Nordlichts bisher noch nicht gegeben ist, — die Zeiten, in denen sein Auftreten von der abergläubischen Prophezeiung des Aufloderns der Kriegsfackel begleitet war, sind längst entschwunden.

Eine lichtvolle Erkenntnis ist an die Stelle ängstlicher Deutung getreten. Das Begreifliche verliert die furchterregende Macht, durch welche das Wunderbare über die Schwachen herrscht.

Das „magnetische Ungewitter“ ist wie das elektrische gewissermaßen ein Versöhnungsakt, ein Vereinigen entgegengesetzter Kräfte, ein Ausgleich von Spannungen, ein Symbol des eintretenden Friedens; Blitz und Nordlicht sind „Liebesboten, die verkünden, was ewig schaffend uns umwallt.“

„Denkt man sich nun ein lebhaftes Schießen von Strahlen, welche beständig sowohl in Beziehung auf ihre Länge als auf ihren Glanz sich ändern, daß sie die herrlichsten roten und grünen Farbentöne zeigen, daß eine wellenartige Bewegung stattfindet, daß Lichtströme einander folgen und endlich, daß das ganze Himmelsgewölbe eine ungeheure prächtige Lichtkuppel zu sein scheint, welche über einen mit Schnee bedeckten Boden ausgebreitet ist und einen blendenden Rahmen für das ruhige Meer bildet, welches dunkel ist wie ein Asphaltsee, so hat man eine unvollständige Vorstellung von diesem wunderbaren Schauspiele, auf dessen Beschreibung man verzichten muß." So schildert Lottin die zu Bossekop beobachteten Nordlichter. Was wir in unseren Gegenden von dieser Erscheinung wahrnehmen, kann mit dem Glanze, welchen das Phänomen im Norden hat, nicht verglichen werden.

Die spektroskopische Untersuchung der Nordlichter hat ergeben, daß das Spektrum des Lichtbogens vorzugsweise aus einer einzigen hellen, gelbgrünen, zwischen den Fraunhoferschen Linien D und E gelegenen Linie, der sogenannten **Nordlichtlinie**, besteht, welche Ångström auch im Spektrum des Zodiakallichtes beobachtet hat; sie stimmt mit keiner der uns bekannten Gaslinien überein (vergl. S. 337, Abb. 403).



648. Nordlicht.

Die Grenzen, innerhalb deren ein Nordlicht sichtbar ist, sind oft sehr weit; daraus läßt sich auf die große Höhe, in welcher sich das Phänomen abspielt, ein Schluß ziehen. So wurde z. B. das Nordlicht vom 28. August 1859 auf einer Strecke von 140 Längengraden, von Kalifornien bis Osteuropa und von Jamaika bis in die nördlichsten Gegenden von Britisch-Amerika beobachtet, und aus ähnlichen Beobachtungen hat Mairan die Höhe des Nordlichts auf mehr als 100 geographische Meilen geschätzt.

In dem Auftreten der Polarlichter scheint eine gewisse Periodizität zu herrschen. Abgesehen davon, daß Loomis für Kanada die Stunden gegen 11 Uhr nachts, für höhere Breiten die Zeit um Mitternacht und 1 Uhr morgens als diejenigen Zeiten angibt, zu denen sie am häufigsten erscheinen, haben einige Forscher, namentlich R. Wolf und Fritz, nachzuweisen versucht, daß ein Maximum der Häufigkeit der Nordlichter immer nach Verlauf von elf Jahren wiederkehre. Fünf solcher elfjährigen Perioden sollen Abschnitte bezeichnen, welche durch noch bedeutendere Maxima hervortreten. Es soll hierbei nicht unerwähnt bleiben, daß man auch für die Wiederkehr der Sonnenflecken eine elfjährige Periode und für die der Sternschnuppen (nach Humboldt) eine dreiunddreißigjährige beobachtet zu haben glaubt.

Die Übereinstimmung der Strahlenrichtung mit dem magnetischen Meridian führte, wie bereits erwähnt, schon zeitig auf die Vermutung, daß das Nordlicht mit dem Erdmagnetismus in engem Zusammenhange stehe. Seit man nun auch noch beobachtet hat, daß über dem Himmel des Südpols dieselben wunderbaren Ausstrahlungen von Zeit zu Zeit stattfinden, daß diese Südlichter oft gleichzeitig mit den Nordlichtern auftreten, und beide in unverkennbarer Abhängigkeit von einander stehen; seit man die Einflüsse derselben auf die Magnetnadel oft und so genau beobachtet hat, daß Arago von seinem Zimmer zu Paris, viele Hundert Meilen vom Nordpol entfernt, aus den Bewegungen seiner Nadel das gleichzeitige Aufflammen eines Nordlichts über den nordischen Himmel verkünden konnte, seitdem war man geneigt, diese vielbewunderte und früher vielgefürchtete Naturerscheinung für das zu halten, was sie Humboldt nennt, für ein magnetisches Ungewitter, in welchem die gestörten Verhältnisse durch einen plötzlichen Ausgleich dem Gleichgewichtszustande wieder zustreben.

Nach de la Rive ist das Nordlicht eine Erscheinung atmosphärischer Elektrizität, deren Erklärung wir des Zusammenhangs wegen schon an dieser Stelle bringen wollen, obgleich einige für das Verständnis erforderlichen Begriffe erst in der Elektrizitätslehre ihre Besprechung finden werden:

Durch die Dämpfe, welche von dem mit positiver Elektrizität geladenen Meerwasser aufsteigen, wird die positive Elektrizität in die höheren Regionen der Atmosphäre und durch den rückkehrenden Passat den Polen zugeführt, während die Erde selbst mit negativer Elektrizität geladen bleibt. Die gut leitende verdünnte Luft der höheren Regionen und die gleichfalls gut leitende Erde bilden so gewissermaßen die beiden Belegungen eines Kondensators, dessen isolierende Schicht durch die unteren Regionen der Atmosphäre gebildet wird. Dort wo die positive Luftschicht der negativen Erdoberfläche am nächsten ist, also in der Nähe der Pole, werden sich nun die entgegengesetzten Elektrizitäten vorzugsweise verdichten, und wenn eine gewisse Spannung erreicht ist, wird eine Ausgleichung in Form von Entladungen, und zwar nahezu gleichzeitig an beiden Polen, erfolgen müssen. Infolge dieser Entladungen muß auf der Erde die positive Elektrizität von den Polen zum Äquator und die negative in umgekehrter Richtung strömen, und infolge dieses elektrischen Stroms muß auf der nördlichen Hemisphäre der Nordpol der Deklinationsnadel nach Westen abgelenkt werden. Thatsächlich findet die magnetische Ablenkung, wie oben erwähnt, in diesem Sinne statt, auch läßt sich die bezeichnete Richtung jenes durch das Nordlicht hervorgerufenen Erdstroms in den Drahtleitungen zweier nördlich gegen einander gelegenen Telegraphenstationen nachweisen. De la Rive hat einen Apparat konstruiert, welcher eine Nachbildung der das Nordlicht begleitenden Erscheinungen ermöglicht. Die de la Rivesche Nordlichttheorie ist nicht einwurfsfrei. In neuerer Zeit (Mitte der achtziger Jahre) ist es Lemström gelungen, die Erscheinungen des Nordlichts künstlich nachzubilden und seinen elektrischen Ursprung nachzuweisen, indem er auf hohen Berggipfeln ein System isolierter, aber mit einander leitend verbundener Ausströmungsspitzen aufstellte und von ihnen eine isolierte Leitung thalabwärts und nach Einschaltung eines Galvanometers zur Erde führte. Es flammten über den Ausströmungsspitzen gelblich-weiße Lichtsäulen bis zu einer Höhe von etwa 120 m auf, welche, spektroskopisch untersucht, die charakteristische Nordlinie zeigten; zu gleicher Zeit waren elektrische Ströme nachweisbar, deren positive Richtung von der Atmosphäre zur Erde ging. Wenn auch eine in allen Punkten erschöpfende Theorie des Nordlichts bisher noch nicht gegeben ist, — die Zeiten, in denen sein Auftreten von der abergläubischen Prophezeiung des Aufloderns der Kriegsfackel begleitet war, sind längst entschwunden.

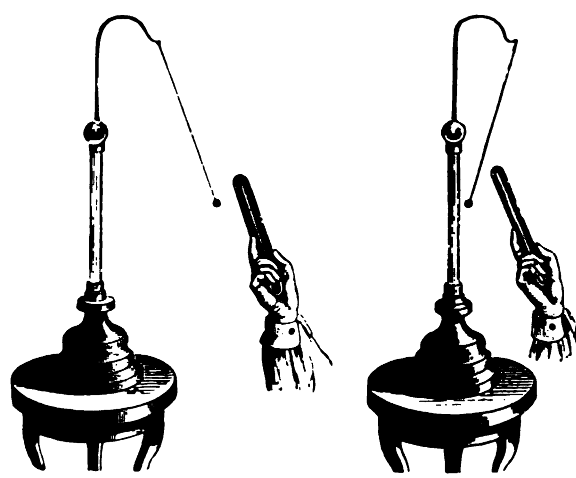
Eine lichtvolle Erkenntnis ist an die Stelle ängstlicher Deutung getreten. Das Begreifliche verliert die furchterregende Macht, durch welche das Wunderbare über die Schwachen herrscht.

Das „magnetische Ungewitter" ist wie das elektrische gewissermaßen ein Versöhnungsakt, ein Vereinigen entgegengesetzter Kräfte, ein Ausgleich von Spannungen, ein Symbol des eintretenden Friedens; Blitz und Nordlicht sind „Liebesboten, die verkünden, was ewig schaffend uns umwallt."

elektrischen Pendel gegenüber scheinbar in derselben Art wie Siegellack. Allein es findet zwischen der Wirkung des Siegellacks und der des Glases doch ein namhafter Unterschied statt. Denn hängen wir zwei Holundermarkkügelchen in der angegebenen Weise jedes für sich auf und berühren das eine mit der geriebenen Siegellackstange, das andere mit der Glasröhre, so flieht das erste von dem Augenblick der Berührung an die Siegellackstange, wird dagegen von der Glasröhre angezogen. Umgekehrt nähert sich dasjenige Kügelchen, welches von der Glasröhre abgestoßen wird, der Siegellackstange.

Positive und negative Elektrizität. Dieses von Dufay um das Jahr 1730 zuerst beobachtete, entgegengesetzte Verhalten hat zur Annahme zweier entgegengesetzten Arten von Elektrizität geführt, welche man Glas- oder positive Elektrizität und Harz- oder negative Elektrizität genannt hat, und zu dem Fundamentalsatz, daß gleichnamig elektrisierte Körper sich abstoßen, ungleichnamig elektrisierte sich anziehen.

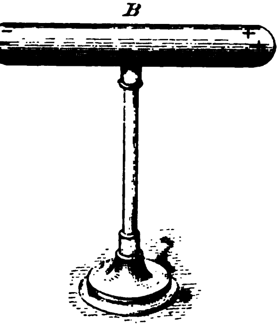
Alle Körper können durch Reiben vorübergehend elektrisch gemacht werden, ob positiv oder negativ elektrisch, können wir mittels des elektrischen Pendels erkennen. Ist das Korkkügelchen durch Berührung mit einer geriebenen Glasröhre positiv elektrisch geworden, so wird es in gleicher Weise wie von der Siegellackstange, von jedem negativ elektrischen Körper angezogen, von jedem positiv elektrischen aber abgestoßen. Feinere Instrumente zur Unterscheidung der beiden Arten von Elektrizität und zur Messung derselben werden wir alsbald im Elektroskop und später im Elektrometer kennen lernen.


646 u. 647. Elektrisches Pendel.

Wiederholt man den Versuch mit den Korkkügelchen mit einer geriebenen Metallstange, so zeigt sich keine Einwirkung auf die Kügelchen. Die durch Reibung erzeugte Elektrizität fließt sofort aus der Metallstange durch die Hand und den menschlichen Körper zur Erde ab, während sie bei der Glasstange an der Erregungsstelle haften bleibt. Ist die Metallstange aber mit einer Handhabe aus Glas versehen, so erhält man bei Wiederholung des Versuchs dasselbe Resultat, wie oben bei Anwendung der Glas- oder Siegellackstange.

Scheidungshypothese. Als Ursache der elektrischen Erscheinungen nimmt man ähnlich, wie bei den magnetischen Erscheinungen, nach Coulomb zwei imponderable Flüssigkeiten, elektrische Fluida an, welche entgegengesetzte Eigenschaften besitzen, so daß Teilchen derselben Flüssigkeit sich abstoßen, während sich Teilchen entgegengesetzter Flüssigkeit anziehen; man unterscheidet sie deshalb als positive und negative Elektrizitäten. In einem unelektrischen oder neutralen Körper sollen beide Arten Fluiden in gleicher Menge und gleichmäßig durch einander gemischt vorhanden sein, so daß ihre Wirkung nach außen Null ist. Der Akt der Elektrisierung der Körper besteht in einer teilweisen Trennung der beiden Fluiden, so daß an einer Stelle ein Überschuß von positiver oder negativer Elektrizität auftritt, welche freie Elektrizität heißt und nach außen wirksam ist. Ein wesentlicher Unterschied aber zwischen der Hypothese von der Existenz der beiden magnetischen Fluiden gegenüber der von der Existenz der elektrischen besteht darin, daß, während die magnetischen Fluiden an das Molekül gebunden sind und nicht von Molekül zu Molekül übergehen können, die elektrischen Fluiden sich bis zu einem gewissen Grade im Körper bewegen und von einem Körper zu einem anderen übergehen können, und zwar um so leichter, ein je besserer Leiter der betreffende Körper ist. Zur Erklärung der Fortpflanzung der Elektrizität in einem Leiter nimmt man an, daß ihn die beiden Arten von Elektrizitäten

in entgegengesetztem Sinne durchfließen. Wenn auch die Hypothese von der Existenz der beiden elektrischen Fluiden als eine befriedigende Erklärung für die wahre Ursache der elektrischen Erscheinungen nicht gelten kann, letztere vielmehr aller Wahrscheinlichkeit nach als eine besondere Art von Ätherschwingungen aufzufassen sind, so ist sie doch aus einer Erfahrungsthatsache gefolgert und erweist sich für den Zusammenhang vieler elektrischen Erscheinungen, sowie für die Anwendung der mathematischen Analyse als sehr nützlich; man hat sich nur, wenn man von positiver oder negativer Elektrizität spricht, nicht besondere Flüssigkeiten vorzustellen, sondern bestimmte, durch die Wirkung nach außen hin charakterisierte Zustände eines Körpers.

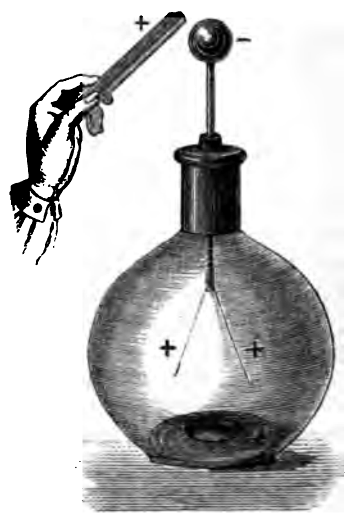


648. Elektrische Influenz.

Wir können uns nach dem Vorhergehenden einen unelektrischen Körper so vorstellen, als wenn er mit gleichen Mengen positiver und negativer Elektrizität, welche sich neutralisieren, geladen wäre.

Elektrische Influenz. Wird einem unelektrischen, isolierten Körper B ein (etwa positiv) elektrischer Körper A genähert (Abb. 648), ohne ihn zu berühren, so wird B durch Influenz elektrisch, d. h. es werden die in ihm vereinigt gewesenen Elektrizitäten getrennt, seine negative Elektrizität wird von A angezogen und in gebundenem Zustande festgehalten, die positive abgestoßen. Man nennt A den influenzierenden, B den influenzierten Leiter.

Besteht der Leiter B aus zwei Teilen, die man von einander trennen kann, so läßt sich nachweisen, daß die dem Leiter A zugewandte Hälfte mit negativer, die andere mit positiver Elektrizität geladen ist. Verbindet man, während der Leiter B dem elektrisierten Leiter gegenübersteht, das abgewandte Ende von B für einen Augenblick leitend mit der Erde, so fließt seine positive Elektrizität in dieselbe. Entfernt man alsdann den influenzierenden Körper A, so kann sich die von ihm gebunden gewesene negative Elektrizität frei über die Oberfläche von B ausbreiten, und B erweist sich als negativ elektrisch. Man kann also auf diese Weise einen Körper durch bloße Annäherung an einen elektrischen Körper mit der entgegengesetzten Elektrizitätsart laden.



649. Goldblattelektroskop.

Wird A von B entfernt, so vereinigen sich wieder beide Elektrizitäten von B und neutralisieren sich. Durch den Prozeß der Influenz werden stets genau gleiche Mengen positiver und negativer Elektrizität erzeugt.

Alle diese Erscheinungen lassen sich leicht mit Hilfe des Goldblattelektroskops nachweisen. Dasselbe ist folgendermaßen eingerichtet: In eine Glaskugel ist durch Schellack wohl isoliert ein Metallstab eingeführt, welcher an seinem oberen Ende mit einer kleinen Kugel, dem Knopf, versehen ist und an seinem unteren, abgeschrägten Ende zwei leichte, genau gleiche Goldschaumblättchen trägt. Nähert man einen mit Amalgam geriebenen Glasstab dem Knopf des Elektroskops, so wird der Metallstab demselben durch Influenz elektrisch; seine negative Elektrizität wird vom Glasstab angezogen, die positive abgestoßen und nach den Goldblättchen getrieben; diese werden also einander abstoßen und divergieren, solange der Glasstab sich in der Nähe des Elektroskopknopfs befindet, und sie werden wieder zusammenfallen, wenn er entfernt wird. Berührt man aber, während der Glasstab sich in der Nähe des Knopfes befindet, diesen mit dem Finger, so fließt die positive Elektrizität zur Erde ab, während die negative Elektrizität von dem Glasstab in

gebundenem Zustande festgehalten wird. Entfernt man dann zuerst den Finger und hierauf den Glasstab, so verbreitet sich die negative Elektrizität nach den Goldblättchen, welche infolgedessen mit negativer Elektrizität divergieren. Genau in derselben Weise kann man das Elektroskop mittels einer negativ geladenen Siegellackstange durch Influenz positiv elektrisch laden (Influenzelektrizität erster Art). Durch Berührung des Knopfes mit einem geriebenen Glas-, resp. Siegellackstabe wird dagegen das Elektroskop positiv, resp. negativ geladen (Influenzelektrizität zweiter Art). Um nun mittels des Elektroskops entscheiden zu können, ob ein Körper positiv oder negativ elektrisch ist, ladet man dasselbe mit einer beliebigen Elektrizität, etwa mit positiver, so daß die Goldblättchen eine passende Divergenz zeigen, und nähert dem Elektroskop den zu untersuchenden Körper. Ist er positiv elektrisch, so wird er die negative Elektrizität anziehen und die positive abstoßen und in die Goldblättchen treiben, deren Divergenz also vergrößern; ist er negativ elektrisch, so wird er, da er die positive Elektrizität anzieht und die negative in die Goldblättchen treibt, deren Divergenz verkleinern. Man kann auf diese Weise auch zeigen, daß durch Reiben zweier Körper an einander stets beide Körper elektrisch werden, und zwar der eine positiv, der andere negativ. Das Glas wird durch Reiben mit Amalgam positiv, das Amalgam negativ elektrisch, Ebonit durch Reiben mit Pelzwerk negativ, das Pelzwerk positiv elektrisch. Stets sind die erzeugten Elektrizitätsmengen gleich groß, aber entgegengesetzt.

Coulombsches Gesetz. — Einheit der Elektrizitätsmenge. Die Erfahrung lehrt, daß, wenn man eine isolierte, unelektrische Metallkugel mit einer isolierten, elektrisierten Metallkugel berührt, diese so viel an Elektrizität verliert, als die erstere gewinnt. Sind die Kugeln gleich groß, so enthält nach der Berührung jede Kugel nur die Hälfte der ursprünglich auf der einen Kugel vorhanden gewesenen Elektrizität. Man wird also von einer Quantität von Elektrizität sprechen können, mit welcher jede Kugel geladen ist. Indem man sich die Kugel unbeschränkt klein vorstellt, während die auf ihr vorhandene Elektrizitätsmenge einen endlichen Wert behält, gelangt man zur Vorstellung eines mit einer bestimmten Elektrizitätsmenge geladenen Punkts, in demselben Sinne, in welchem „Menge von Magnetismus" für die Stärke eines magnetischen Pols gebraucht wird.

In ähnlichem Sinne haben wir in der Optik von Lichtmenge und in der Wärmelehre von Wärmemenge gesprochen, ohne mit diesen Begriffen die Vorstellung von einem Stoffe zu verbinden. Ebenso wie die Mengen von Magnetismus, so messen wir auch die Mengen von Elektrizität durch die Wirkungen, die sie auf einen anderen Körper ausüben. Wir sagen, zwei Mengen von Elektrizität sind gleich, wenn sie unter denselben Umständen auf einen und denselben Körper identische Wirkungen ausüben, und wir nennen zwei Mengen von Elektrizität gleich und entgegengesetzt, wenn sie unter denselben Umständen auf einen und denselben Körper gleich große, aber entgegengesetzte Wirkungen ausüben.

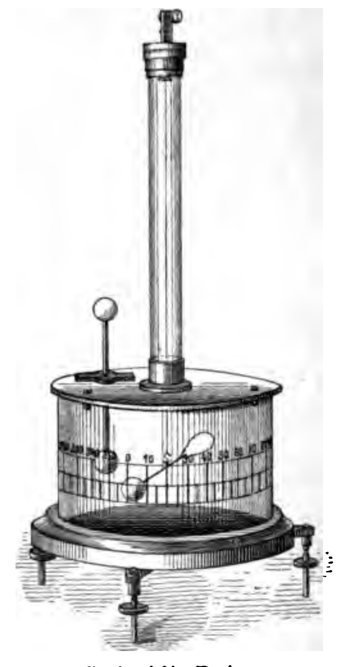
Das Gesetz, nach welchem zwei kleine elektrisierte Körper auf einander wirken, ist zuerst von Coulomb im Jahre 1785 durch Versuche auf der nach ihm benannten Drehwage aufgefunden worden. Sie hat folgende Einrichtung (Abb. 650): An einem Torsionskreise ist ein feiner Faden befestigt, welcher ein horizontales Schellackstäbchen (Wagebalken) trägt. Das eine Ende desselben ist mit einer kleinen, leitenden Kugel versehen, während das andere Ende als Gegengewicht eine Glimmerscheibe trägt. Durch einen isolierten Stab wird eine zweite, der ersteren genau gleiche Kugel (die Standkugel) auf einem bestimmten Punkte des Kreises gehalten, den die bewegliche Kugel beschreiben kann. Ein weiter Glascylinder mit aufgesetzter, konaxialer Röhre umschließt den ganzen Apparat. Vor dem Versuche berühren beide Kugeln einander bei nicht tordiertem Aufhängefaden. Gibt man nun der Standkugel eine bestimmte Ladung, so verteilt sich diese bei der Berührung auf beide Kugeln, und die bewegliche wird abgestoßen. Um sie dann auf einen bestimmten an einer Kreisteilung abzulesenden Winkelabstand gegen die Standkugel zurückzuführen, muß der Faden um einen gewissen Winkel tordiert werden, und die Größe des am Torsionskreise abgelesenen Torsionswinkels bietet ein Maß für die Kraft, mit welcher die beiden elektrisierten Kugeln einander abstoßen. Das Coulombsche Gesetz lautet nun folgendermaßen:

Zwei kleine elektrisierte Körper üben auf einander in Richtung ihrer Verbindungslinie je nachdem sie ungleichnamig oder gleichnamig elektrisiert sind, eine anziehende oder abstoßende Kraft aus, welche gleich dem Produkte ihrer Elektrizitätsmengen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung ist.

Das Coulombsche Gesetz setzt uns in den Stand, die sogenannte elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge im C.G.S.-System zu definieren: die **elektrostatische Einheit** der Elektrizitätsmenge ist diejenige, welche auf eine gleich große, um 1 cm von ihr entfernte Menge (beide in Punkten konzentriert gedacht) die Kraftwirkung einer Dyne ausübt.

Statt dieser Einheit, welche sehr klein ist, wendet man zur Messung von Elektrizitätsmengen in der elektrotechnischen Praxis eine auf anderer Grundlage beruhende Einheit an, nämlich das **Coulomb**, welche dreitausendmillionenmal größer ist, als die eben definierte elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge.

Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche. Die Erfahrung sowohl, wie die mathematische Physik lehren bezüglich der Verteilung der freien Elektrizität in einem elektrisierten Leiter, daß keine freie Elektrizität im Inneren des Leiters existiert, sondern daß sie sich nur auf der Oberfläche desselben befindet, und daß in dem von dieser umschlossenen, inneren Raum keine elektrische Kraft ausgeübt wird.



650. Coulombsche Drehwage.

Den experimentellen Nachweis für die Richtigkeit dieses Satzes hat **Faraday** gegeben. Er ließ sich ein isoliert aufgestelltes, mit leitender Oberfläche vollkommen bekleidetes Zimmer bauen und begab sich selbst, mit empfindlichen Elektroskopen ausgerüstet, in dasselbe hinein. Wie stark er es nun auch von außen mittels großer Elektrisiermaschinen elektrisieren ließ — es konnten außen lange Funken aus den Wänden gezogen werden — im Inneren ließ sich keine Spur von Elektrizität nachweisen.

Eine gleichförmige Verteilung der Elektrizität findet nur auf einer vollkommenen Kugelfläche statt; im allgemeinen ist die Ladung ungleichförmig, je nach der Gestalt des Leiters, an Stellen größter Krümmung am größten. Man nennt das Verhältnis der auf einem kleinen Flächenstück des Leiters enthaltenen Elektrizitätsmenge zur Größe dieses Flächenstücks die **elektrische Dichtigkeit** oder die Dicke der elektrischen Schicht an dieser Stelle. An sehr stark gekrümmten Stellen der Oberfläche, besonders also an **Spitzen**, ist die elektrische Dichtigkeit und also auch die elektrische Kraft sehr groß, so daß aus Spitzen leicht die Elektrizität die sie umgebende, isolierende Luftschicht durchbricht, d. h. ausströmt.

Elektrisches Kraftfeld. Wir haben auf Seite 484 den Begriff des magnetischen Kraftfelds definiert. In analoger Weise nennen wir ein elektrisches Kraftfeld jeden Raum, in welchem durch die Anwesenheit eines elektrischen Körpers eine Kraftwirkung ausgeübt wird. Die Stärke H des Kraftfelds in irgend einem Punkte wird gemessen durch die Kraft, welche daselbst auf einen mit der Einheit der Elektrizitätsmenge geladenen Punkt ausgeübt werden würde, vorausgesetzt, daß durch dessen Anwesenheit keine Störung des elektrischen Zustands des Kraftfelds hervorgerufen wird. Auf einen Punkt, der die Elektrizitätsmenge e enthält, wird eine Kraft He ausgeübt werden.

Wird der Punkt im Kraftfelde entgegen der auf ihn wirkenden resultierenden Kraft bewegt, so begegnet er einem meßbaren Widerstande, zu dessen Überwindung Arbeit verbraucht wird; wird er dagegen durch die auf ihn wirkende Kraft selbst bewegt, so wird Arbeit geleistet.

In einem Punkte des Kraftfelds herrscht die Feldstärke Eins im C.G.S.-System, wenn daselbst ein mit der Einheit der Elektrizitätsmenge geladener Punkt die Kraftwirkung einer Dyne erfährt.

Potential. Wir müssen uns nun mit einem Begriffe vertraut machen, welcher zwar schon in der Mechanik seine Begründung und Behandlung findet, welcher aber in allen Zweigen der Physik eine wichtige Rolle spielt, das ist der Begriff des **Potentials**. Was für die Probleme der tropfbar flüssigen Körper der Begriff des hydrostatischen Drucks, für die Gastheorie der Begriff der Spannkraft, für die Wärmelehre der Begriff der Temperatur ist, das ist für die elektrischen Erscheinungen der Begriff des elektrischen Potentials.

Wird durch einen die Elektrizitätsmenge $+e$ enthaltenden Punkt A (Abb. 651) ein elektrisches Kraftfeld erzeugt, so wird auf einen in der Entfernung r befindlichen, die positive Einheit der Elektrizitätsmenge enthaltenden Punkt M nach dem Coulombschen Gesetz in Richtung von r eine abstoßende Kraft $\frac{e}{r^2}$ ausgeübt; der Ausdruck $\frac{e}{r}$ heißt das Potential des der Wirkung von e unterworfenen Punkts M, oder kürzer das Potential von M. Es hat eine wichtige physikalische Bedeutung: Bewegt sich der Punkt M in Richtung der elektrischen Kraft nach M', so leistet die Kraft Arbeit (Kraft mal Weg). Der mit Elektrizität geladene Punkt M repräsentiert also, gleich einem gehobenen Gewicht, im elektrischen Kraftfelde eine gewisse potentielle Energie, welche aufgezehrt sein wird, wenn er in unendliche Entfernung von A gerückt ist. Das Potential von M drückt also die Arbeit aus, welche die elektrische Kraft des Felds leistet, wenn durch sie die Elektrizitätsmenge 1 vom Punkte M in unendliche Entfernung gebracht wird, oder auch die Arbeit, welche entgegen der elektrischen Kraft des Felds aufgewandt werden muß, um die Elektrizitätsmenge 1 aus unendlicher Entfernung nach M zu bringen. Im allgemeinen wird das Potential für verschiedene Punkte des elektrischen Kraftfelds verschieden sein. Die Differenz der Potentiale zweier Punkte ist gleich der Arbeit, welche geleistet werden müßte, um die Einheit der Elektrizitätsmenge von dem einen Punkte zum anderen entgegen der Kraft des Felds überzuführen; zwischen zwei Punkten wird also die Einheit der Potentialdifferenz herrschen, wenn zu dieser Überführung die Einheit der Arbeit (Erg) geleistet werden muß. Die in der Praxis übliche Maßeinheit für Potentialdifferenzen, das **Volt**, wird später definiert werden. Die Punkte eines elektrischen Felds, deren Potentiale denselben konstanten Wert haben, bilden eine Oberfläche, welche **Fläche gleichen Potentials** oder Niveaufläche heißt. Zur Verschiebung einer Elektrizitätsmenge längs einer Niveaufläche ist keine Arbeit erforderlich. In jedem Punkte derselben ist die daselbst wirkende Kraft senkrecht gegen die Niveaufläche gerichtet. Ebenso wie die Oberfläche eines Wasserreservoirs sich dann im Gleichgewichte befindet, wenn alle Wasserteilchen der Oberfläche dasselbe Niveau haben, so kann auch elektrisches Gleichgewicht auf einem Leiter nur bestehen, wenn alle Punkte dasselbe Potential haben, wenn das Potential des Leiters einen konstanten Wert hat. Die elektrische Kraft ist dann an allen Stellen senkrecht zur Oberfläche gerichtet und kann keine Bewegung der Elektrizität auf dem Leiter hervorbringen; ebenso wie auf jedes Teilchen einer im Gleichgewicht befindlichen Wasseroberfläche die Kraft senkrecht zur Oberfläche wirkt und kein Strömen des Wassers von einem Punkt zum anderen hervorbringen kann.

M'
(+1) M
r
(+e) A

651.

Obschon der wahre elektrische Zustand der Erde uns unbekannt, jedenfalls ein komplizierter, an verschiedenen Punkten sehr verschiedener ist, wie unter anderem aus den Beobachtungen der erdmagnetischen Störungen hervorgeht, so pflegt man praktisch das Potential der Erde als Null anzunehmen, in ähnlicher Weise, wie man bei Höhenmessungen von einem bestimmten Niveau, nämlich dem Meeresspiegel, als Ausgangspunkt rechnet.

Das Potential irgend eines Punktes ist dann die Differenz zwischen seinem Potential und demjenigen der Erde, analog der Höhe eines Punktes über dem Meeresniveau, und

kann gemessen werden durch die Arbeit, die geleistet werden muß, um die Einheit der Elektrizitätsmenge entgegen den Kräften des Feldes von der Erdoberfläche nach diesem Punkte überzuführen.

Werden zwei Leiter von verschiedenem Potential mit einander verbunden, so strömt stets Elektrizität von dem Leiter mit höherem Potential zu dem mit niedrigerem Potential, gleichwie in zwei, durch eine Röhre verbundenen Flüssigkeitsreservoiren von verschiedenen Niveaus die Flüssigkeit stets aus dem Reservoir mit höherem Niveau zu demjenigen mit niedrigerem Niveau überströmt so lange, bis beide das gleiche Niveau haben. Durch Verbindung eines geladenen Leiters mit der Erde wird sein Potential auf Null gebracht.

Kapazität. Das Potential eines elektrisierten Leiters wird um so größer sein, je mehr Elektrizität ihm zugeführt wird, gleichwie in einem mit Gas gefüllten, verschließbaren Gefäße der Druck des Gases um so größer ist, je mehr Gas dem Gefäße zugeführt wird. Gleichwie ferner gleiche Gasmengen in Gefäßen von verschiedener Kapazität einen verschiedenen Druck ausüben werden, und zwar in dem Gefäße von größerer Kapazität einen kleineren Druck, als in dem von kleinerer Kapazität, so werden Leiter von verschiedener Größe durch gleiche Elektrizitätsmengen zu verschiedenen Potentialwerten geladen werden. Man nennt das Verhältnis der auf einem Leiter angesammelten Elektrizitätsmenge zu seinem Potential die Kapazität des Leiters.

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Potential}}.$$

Sie hängt, wenn sich keine influenzierbaren Körper in der Nähe befinden, nur von der Gestalt und den Dimensionen des Leiters ab.

Ein Leiter besitzt die Kapazität Eins, wenn er durch die Einheit der Elektrizitätsmenge zum Potentialwerte Eins geladen wird. Die in der Technik gebräuchliche Einheit, das Farad, soll später definiert werden.

Kondensator. Dielektrizitätskonstante. Wird ein Leiter mit einer Elektrizitätsquelle, welche Elektrizität von einem bestimmten Potentialwerte liefert, verbunden, so nimmt er eine bestimmte, von seiner Kapazität abhängige Elektrizitätsmenge auf. Seine Kapazität, also auch die von ihm aufzunehmende Elektrizitätsmenge wird vergrößert, wenn ihm ein zweiter, zur Erde abgeleiteter Leiter gegenübergestellt wird. Man nennt eine solche Anordnung, welche aus zwei, durch einen Isolator getrennten Leitern besteht und den Zweck hat, bei gegebener Potentialdifferenz und verhältnismäßig geringer Oberfläche eine möglichst große Elektrizitätsmenge aufzunehmen, einen Kondensator. Die beiden Leiter heißen gewöhnlich Belegungen, der Isolator das Dielektrikum, das konstante Verhältnis der Elektrizitätsmenge zur Potentialdifferenz die Kapazität des Kondensators. Der Wert der letzteren ist abhängig von der Größe und Gestalt der Belegungen, sowie von der Natur und Dicke des Dielektrikums, er ist unabhängig von der Natur des Metalls, welches für die Belegungen verwandt wird. Die Versuche ergeben, daß bei Anwendung irgend eines festen oder flüssigen Dielektrikums als isolierender Substanz die Kapazität des Kondensators ceteris paribus größer ist, als bei Anwendung von Luft als isolierende Substanz. Man nennt den Koeffizienten, mit welchem man die Kapazität eines Luftkondensators multiplizieren muß, um die Kapazität desselben Kondensators für ein anderes Dielektrikum, als Luft, zu erhalten, das spezifische Induktionsvermögen, oder die Dielektrizitätskonstante der betreffenden Substanz.

Zwischen der Dielektrizitätskonstante und dem Brechungsexponenten einer Substanz für sehr lange Wellen besteht eine interessante und für den Zusammenhang zwischen elektrischen und Lichterscheinungen wichtige Beziehung, welche sich als Folgerung aus der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie ergibt, daß sich nämlich die Brechungsexponenten wie die Quadratwurzeln aus den Dielektrizitätskonstanten verhalten.

Nachdem wir so die wichtigsten Begriffe der Elektrizitätslehre auseinandergesetzt haben, wollen wir nunmehr zur Beschreibung der Apparate übergehen, durch welche wir Elektrizität erzeugen.

Die Reibungselektrisiermaschine. Sie besteht im wesentlichen heute noch, wie bei der ersten Guerickeschen Einrichtung, aus drei Teilen: einem Isolator, welcher gerieben

wird, einem Reibzeuge und einem Körper, welcher die erzeugte Elektrizität aufspeichert, dem sogenannten Konduktor. Das Reibzeug steht mit der Erde in leitender Verbindung, der geriebene Körper dagegen ist isoliert. Guericke bediente sich, wie wir gesehen haben, seiner Hand als Reibzeug; ebenso verfuhr dreißig Jahre später noch Hawksbee, der aber anstatt der Schwefelkugel eine mittels einer Kurbel zu drehende Glaskugel rieb. Die Unvollkommenheit dieser ersten Maschinen hat ihrer allgemeinen Anwendung lange im Wege gestanden. Durch Hausen, Bose und Winkler in Leipzig wurde etwa um die Mitte des 18. Jahrhunderts die Elektrisiermaschine mannigfach verbessert. Der letztgenannte verband die Achse des Elektrizitätserzeugers, der aus einem gewöhnlichen Bierglas bestand, mittels einer Schnur mit einem Wirbel, der wie bei den Drechslerbänken durch einen Tretschemel in Bewegung gesetzt wurde; er brachte auch um 1740 an seiner Maschine zuerst das vom Drechsler Gießing in Leipzig erfundene Reibzeug an, welches mittels Federn an den rotierenden Glascylinder angedrückt wurde.

Der Konduktor, in Form eines Hohlcylinders von Metall, war schon früher in Gebrauch. Der Abbé Nollet isolierte ihn durch Aufhängen an seidenen Fäden; direkt mit der Maschine verbunden wurde er erst von Wilson, welcher auch die noch heute gebräuchliche, kammartige Form des Zuleiters mit den gegen den Glaskörper gerichteten Spitzen, mittels deren die Elektrizität aufgesaugt wird, einführte.

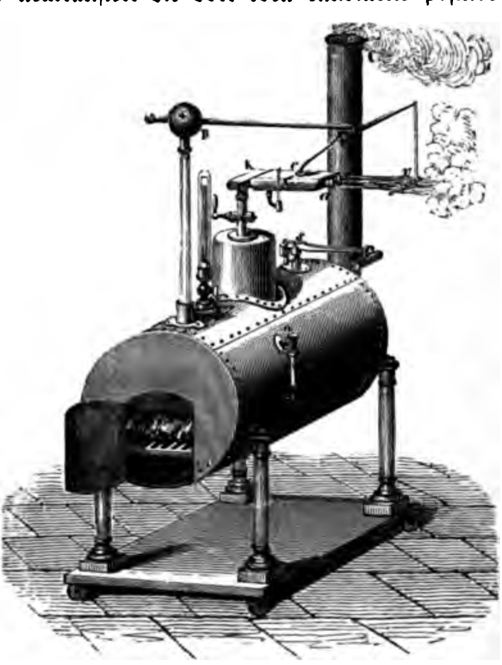
Große Verdienste um die konstruktive Vervollkommnung der Elektrisiermaschine hat sich van Marum erworben. Berühmt ist die unter seiner Anleitung von dem Amsterdamer Mechaniker Cuthbertson im Jahre 1785 für das Teylersche Museum in Haarlem konstruierte Riesenmaschine mit zwei Scheiben von etwa 1,7 m Durchmesser, welche Funken von 60 cm lieferte und mächtige Batterieen zu laden im stande war.

652. Scheibenelektrisiermaschine.

Je nachdem der geriebene Körper eine Glasscheibe oder ein Glascylinder ist, unterscheidet man Scheiben- oder Cylindermaschinen. Wir wollen eine einfache Maschine der ersten Art beschreiben (Abb. 652): Auf einem soliden Tische erheben sich zwei Ständer, welche die durch die Kurbel M drehbare Achse A tragen, auf der die Glasscheibe P sitzt. Gegen sie drücken an beiden Seiten mittels elastischer Federn die Reibzeuge K K'; dies sind zwei auf Holzbrettchen angebrachte Lederkissen, welche auf ihren inneren Seiten mit sogenanntem Kienmayerschen Amalgam (Quecksilber, Zinn und Zink, pulverisiert und mit Schweinefett zu einer Salbe verrieben) bestrichen sind. Von den Reibzeugen gehen Flügel G G von Seide oder Wachstaft aus, welche bei der Drehung der Scheibe sich an diese anlegen und das Ausströmen der positiven Elektrizität des Glases in die Luft und das Zurückschlagen derselben zum Reibzeug verhindern.

Auf der Grundplatte ruht der isolierte, aus einer hohlen Metallkugel bestehende Konduktor C, welcher mit den beiden Zuleitern oder Einsaugern F F' verbunden ist. Dies sind zwei Holzringe, welche auf den der Scheibe zugewandten Seiten mit feinen Spitzen versehen sind, welche die positive Elektrizität der Scheibe aufsaugen und zu dem mit ihnen leitend verbundenen Konduktor C führen. Auf den Konduktor C kann behufs Erzielung größerer Funken noch der sogenannte Wintersche Ring aufgesetzt werden. Das Reibzeug und der mit ihm leitend verbundene Konduktor C' werden durch eine metallische Leitung zur Erde abgeleitet. Das Spiel der Maschine ist nun folgendes:

Wird die Glasscheibe in Umdrehung versetzt, so wird sie durch Reibung an dem amalgamierten Reibzeug mit positiver, das Reibzeug mit negativer Elektrizität geladen; letztere fließt zur Erde ab. Die positive Elektrizität der rotierenden Glasscheibe wirkt influenzierend auf die Spitzen der Einsauger. Aus diesen strömt die erregte negative Elektrizität auf die Glasscheibe über und neutralisiert die dort eben entwickelte positive Elektrizität, während die frei werdende positive Elektrizität der Einsauger sich auf den Konduktor C verbreitet. Dieser wird also mit positiver Elektrizität geladen und zwar um so stärker, je länger die Glasscheibe gedreht wird. Isoliert man den mit dem Reibzeug leitend verbundenen Konduktor C', anstatt ihn zur Erde abzuleiten, während man den Konduktor C zur Erde ableitet, so kann man auf C' die negative Elektrizität des Reibzeugs ansammeln. Die Elektrisiermaschine bietet also ein einfaches und bequemes Mittel, um positive oder negative Elektrizität in beliebiger Menge zu entwickeln und anzusammeln.

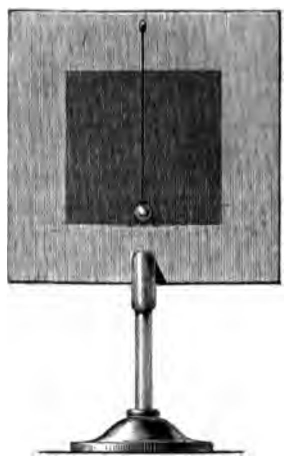


653. Armstrongs Dampfelektrisiermaschine.

Die Ladungsfähigkeit eines Konduktors hängt von der Größe seiner Oberfläche ab. Von einem stark geladenen Konduktor entweicht die Elektrizität allmählich in die Luft, welche ja niemals absolut trocken ist, oder sie springt mit Blitz und Knall selbst auf weit entfernte gute Leiter über. Großen Maschinen können leicht Funken entlockt werden, welche recht empfindlich und nicht unbedenklich auf den menschlichen Organismus wirken. Man darf sich daher dem stark geladenen Konduktor, um sich vor seinen Schlägen zu hüten, nicht zu sehr nähern. Wenn man aber vor dem Beginn des Ladens den Konduktor oder einen von ihm ausgehenden Draht berührt und sich auf eine isolierende Unterlage (Isolierschemel) stellt, dann wird beim Drehen der Maschine der menschliche Körper ebenso gut wie der Konduktor geladen; er gibt Funken, wo man ihn berührt; sein Kopf zeigt, wenn man den Raum verdunkelt, eine Art Licht oder Glorienschein, die Haare sträuben sich empor, denn sie werden mit positiver Elektrizität geladen und fahren, indem sie sich gegenseitig abstoßen, aus einander, wie die Goldblättchen am Elektroskop. Übrigens kann die Entladung eines Konduktors auch geräuschlos, ohne Funken und Knall, vor sich gehen, nämlich wenn man ihm einen Ableiter entgegenhält, der in eine oder mehrere feine Spitzen endigt. Bei feuchter Luft funktioniert die Elektrisiermaschine unsicher und schwach; schon die Gegenwart mehrerer Menschen in einem geschlossenen Raume wirkt ungünstig durch die Feuchtigkeit, welche der Atem der Luft beimengt.

Dampfelektrisiermaschine. Die Thatsache, daß durch die Reibung beim Ausströmen des Wasserdampfes aus engen Röhren Elektrizität entwickelt wird, ist von Armstrong in

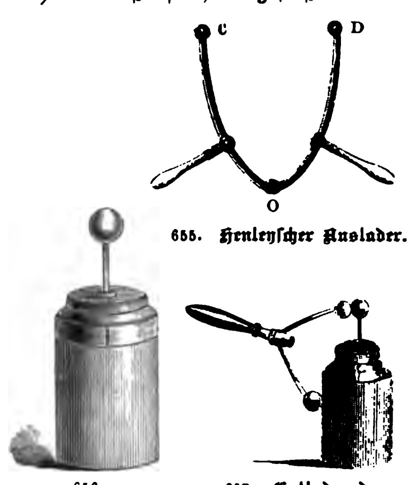
England im Jahre 1840 benutzt worden zur Konstruktion der **Hydro-** oder **Dampf-elektrisiermaschine**, von welcher Abb. 653 uns eine Ansicht gibt. Der Dampf wird in einem auf Glassäulen ruhenden und zur Erde abgeleiteten Kessel entwickelt, dessen Ventil s so lange geschlossen gehalten wird, bis eine beträchtliche Spannung von etwa 10 Atmosphären und darüber erreicht ist. Alsdann läßt man den hochgespannten Dampf durch ein System von schmalen Sägenschnitten und engen Öffnungen in durchbohrte Cylinder von Buchsbaumholz strömen, welche sich in dem bei c angebrachten Stück befinden. Durch die Reibung des Dampfes an den Wänden wird der Kessel mit negativer, der Wasserdampf mit positiver Elektrizität geladen, welche man mittels des zinkenförmigen Zuleiters v auf dem isolierten Konduktor B ansammeln kann.



654. Franklinsche Tafel.

Beim Ausströmen der flüssigen Kohlensäure (vgl. S. 459) aus der Bombe findet eine so starke Reibung derselben gegen die Wand der Ausströmungsöffnung, und bei Anwendung eines Tuchbeutels zum Auffangen der festen Kohlensäure eine so starke Reibung der letzteren gegen das Tuch statt, daß man leicht große Funken aus der Flasche ziehen kann. Die feste Kohlensäure erweist sich dabei als negativ, das Tuch als positiv elektrisch.

Die **Franklinsche Tafel** (Abb. 654) ist eine auf beiden Seiten (von der Mitte bis etwa 3 cm vom Rande) mit Stanniol belegte Glastafel. Wenn man die eine Belegung mittels des Konduktors einer Elektrisiermaschine mit positiver Elektrizität ladet, so wird durch Influenz auf der gegenüberliegenden Innenfläche der zweiten Belegung eine gleich große Menge negativer Elektrizität gebunden, während die positive Elektrizität nach der Außenfläche abgestoßen wird und von dieser mit dem Finger zur Erde abgeleitet werden kann. Die beiden Belegungen sind also mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladen, und deren Vereinigung wird durch die dazwischenliegende isolierende Glasplatte gehindert, solange die Ladungen nicht stark genug sind, sie zu durchschlagen und sich so einen direkten Weg zum Ausgleich zu bahnen. Bei schwächeren Ladungen aber muß man, um einen Ausgleich derselben zu erzielen, über den Rand der Glastafel eine metallische Leitung etwa in Form des **Henleyschen Ausladers** legen (Abb. 655). Dieser besteht aus einem metallenen Kreisbogen, dessen Hälften C und D in einem Scharnier O beweglich sind, und deren Kugelenden mit Hilfe der gläsernen Handgriffe beliebig gegen einander verstellt werden können. Es findet dabei auch bei geringen Ladungen eine verhältnismäßig heftige Entladung statt, die auch von starker physiologischer Wirkung ist. Hiervon kann man sich leicht überzeugen durch Vergleichung der elektrischen Schläge, die man erhält, wenn man einmal einen geladenen Konduktor, das andere Mal die beiden Belegungen einer geladenen Franklinschen Tafel berührt.



655. Henleyscher Auslader.

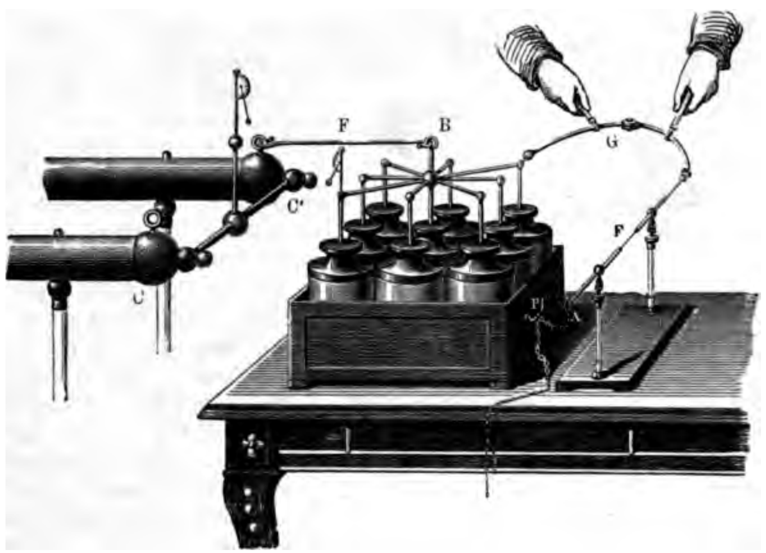
656. Leydener Flasche.

657. Entladen der Leydener Flasche.

Die **Leydener Flasche** ist ein ähnlicher Ansammlungsapparat für Elektrizitätsmengen. Sie besteht aus einem offenen Glascylinder, der innen und außen bis auf etwa zwei Drittel seiner Höhe mit Stanniol belegt ist. Mit der inneren Belegung in Berührung steht eine Metallstange, welche in einen Metallknopf endigt (Abb. 656). Man ladet die Flasche, indem man den Knopf der inneren Belegung mit dem Konduktor einer

Elektrisiermaschine leitend verbindet, während man die Flasche in der Hand hält oder die äußere Belegung metallisch mit dem Erdboden in Verbindung setzt. Die Elektrizitätsmenge, welche die Leydener Flasche aufzunehmen vermag, ihre Kapazität, und also auch ihre Wirkung beim Entladen, hängt von ihren Dimensionen, insbesondere von der Oberflächengröße der beiden Belegungen ab.

Verbindet man mehrere Leydener Flaschen derart leitend mit einander, daß ihre inneren Belegungen mit derselben Elektrizität geladen werden, so hat man eine elektrische Batterie. Die äußeren Belegungen werden zu diesem Zwecke gleichfalls leitend mit einander verbunden und auf eine gemeinschaftliche, zur Erde abgeleitete Unterlage gesetzt. Abb. 658 zeigt eine solche Kombination mehrerer Leydener Flaschen zu einer elektrischen Batterie. C C′ ist der Konduktor der Elektrisiermaschine, der durch die Metallstange T mit den inneren Belegungen der einzelnen Flaschen bei B in leitender Verbindung steht. Die äußeren, gleichfalls unter einander verbundenen sind, durch den Draht P zur Erde abgeleitet. Zur Entladung der Batterie dient die bei A zur Erde abgeleitete Entladungsvorrichtung A F G.



658. Elektrische Batterie.

Oscillierende Entladung. Die Dauer des Entladungsfunkens einer Leydener Flasche ist eine sehr kurze; sie beträgt nach Versuchen von Wheatstone etwa $\frac{1}{24000}$ Sekunden. Die Entladung ist aber keine momentane, sondern wie zuerst Helmholtz auf theoretischem Wege erkannt hat, eine oscillierende, d. h. es findet ein Hin- und Herströmen der Elektrizität zwischen den beiden Belegungen statt, wobei die Schwingungsdauer der oscillierenden Flaschenentladungen etwa $\frac{1}{1000000}$ einer Sekunde beträgt. Die experimentelle Bestätigung hierfür hat Feddersen gegeben, welcher den Entladungsfunken mittels eines sehr schnell rotierenden Spiegels beobachtete und ihn in eine Reihe von Einzelfunken sich lösen sah.

Das Elektrophor, dessen man sich anstatt der Elektrisiermaschine bedienen kann, wenn es sich nur um Erzeugung geringer Elektrizitätsmengen handelt, besteht aus einem möglichst ebenen Harzkuchen (ohne Risse und Sprünge), am besten aus Schellack und venezianischem Terpentin, welcher in eine zur Erde abgeleitete Metallplatte ausgegossen ist, und der bei einem Durchmesser von 25—50 cm etwa 1—2 cm dick sein kann. Er wird durch Peitschen mit einem recht trockenen Katzenfell oder Fuchsschwanz negativ elektrisch gemacht. Legt man dann einen, mit einem isolierenden Handgriffe versehenen

oder an seidenen Schnüren aufgehängten, etwas kleineren Metalldeckel auf den Harzkuchen, so wirkt dessen negative Elektrizität influenzierend auf die neutrale Elektrizität des Deckels; die positive sammelt sich an der unteren Fläche, wo sie gebunden bleibt, die freie negative wird abgestoßen, strömt zur oberen Deckelfläche und kann mit dem Finger zur Erde abgeleitet werden (Abb. 659 links). Solange der Deckel auf dem Kuchen liegt, ist die positive Elektrizität an der unteren Fläche gebunden; sobald er aber abgehoben wird, wird dieselbe frei, und man kann sie ebenfalls in Form von Funken aus ihm ziehen (Abb. 659 rechts). Dieses Spiel kann man, da der Harzkuchen die ihm durch das Peitschen mitgeteilte Elektrizität behält, wiederholen, so oft man will; nur muß man stets während des Aufliegens des Deckels seine obere Fläche ableitend berühren.

Influenz-Elektrisiermaschine. Könnte man die Wirkung des Elektrophors kontinuierlich machen, so würde damit eine neue Form für die Elektrisiermaschine gegeben sein. Dieser Gedanke leitete zwei deutsche Physiker, Holtz in Berlin und Töpler in Dorpat, und führte sie fast gleichzeitig und unabhängig von einander zur Erfindung der „Influenz-Elektrisiermaschine", welche in Abb. 660 und 661 in zwei Ansichten, von vorn und von hinten gesehen, dargestellt ist.

Sie besteht aus zwei parallel und nahe an einander aufgestellten Glasscheiben A und B, von denen die erstere, etwas größere A feststeht, während B mittels eines Schnurlaufs in rasche Umdrehung versetzt werden kann. Die Glasscheibe A wird festgehalten durch Ebonitringe, welche auf den von den vertikalen Glassäulen 1, 2, 3, 4 ausgehenden, horizontalen Glasstäben sitzen. In der Mitte ist sie kreisförmig ausgeschnitten, um die die Scheibe B tragende Welle x durchzulassen. Diese Welle x geht mit stählernen Spitzen in den beiden, zwischen den Säulen 1 und 3 einerseits und 2 und 4 andererseits angebrachten Querstücken k und h. An dem Querstück k sitzen die mit ihren Spitzen der Scheibe B zugekehrten Einsauger g und i und endigen in den Kugeln f und e; durch die Durchbohrungen derselben gehen die mit den beiden Entladungskugeln n und p versehenen Führungsstäbe, so daß n und p beliebig einander genähert oder von einander entfernt werden können. Zwei andere Konduktoren t und v sind an einem senkrechten, gleichfalls von dem Querbalken k getragenen Ebonitstabe angebracht.

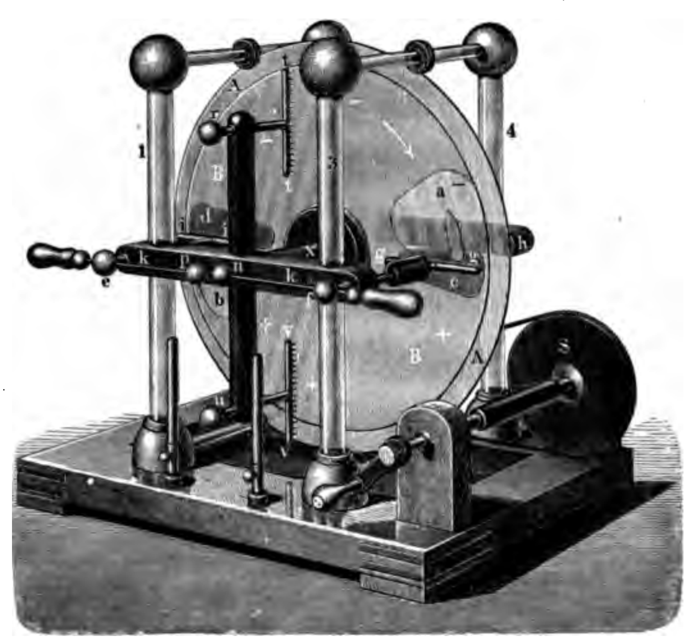


659. Elektrophor.

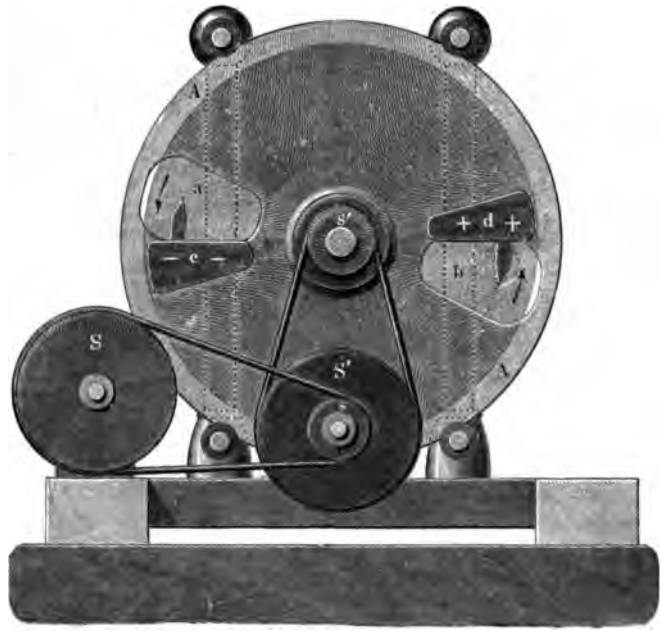
Die feststehende Glasscheibe A hat zwei einander diametral gegenüberstehende Ausschnitte a und b, zwei Papierbelege mit Spitzen c und d aus Pergamentpapier, welche in die Ausschnitte hineinragen. Glasscheibe, Papierbelege und Spitzen sind mit Schellackfirnis überzogen.

Um nun die Maschine in Thätigkeit zu setzen, schiebt man die Kugeln n und p zusammen, teilt der Belegung c Elektrizität, etwa negative, mittels einer geriebenen Siegellackstange mit und dreht die Glasscheibe B im Sinne des Pfeils, so daß sie den Pergamentspitzen entgegenläuft. Die negative Elektrizität der Belegung c wirkt nun influenzierend auf den ihr gegenüberstehenden Einsauger g, treibt dessen negative Elektrizität nach der Kugel n, während seine positive Elektrizität nach den Spitzen gezogen wird, durch diese auf die Glasscheibe B überströmt, von dieser fortgeführt wird, bis die rotierende Scheibe an den anderen Ausschnitt b gelangt. Hier wird ihre positive Elektrizität von der Pergamentspitze d aufgesaugt, und nun wiederholt sich an der positiv geladenen Belegung d und dem Einsauger i dasselbe Spiel in entgegengesetztem Sinne: die positive Elektrizität strömt aus i nach p und neutralisiert die negative von n, während die negative Elektrizität der Belegung c zugeführt wird, also deren ursprüngliche Ladung verstärkt.

Die Ladungen der Belege werden auf diese Weise fort und fort verstärkt, was man an dem Ausströmen der Elektrizität aus den Spitzen der Einsauger g und i hören und im Dunklen deutlich sehen kann, bis zu einem Grenzwerte, der durch die Isolationsfähigkeit der rotierenden Scheibe bedingt ist. Entfernt man alsdann die beiden Elektrodenkugeln n und p allmählich von einander, so bildet sich zwischen ihnen ein kontinuierlicher Funkenstrom. Bei guter Isolierung und trockener Luft kann man mit der Holtzschen Maschine Funkenlängen erhalten, welche der äußersten Entfernung der beiden Elektrodenkugeln entsprechen. Die Wirkung kann noch verstärkt werden, wenn man die Elektroden mit den inneren Belegungen zweier Leydener Flaschen verbindet, deren äußere Belegungen unter einander verbunden und zur Erde abgeleitet werden. Die beiden vertikalen Einsauger t und v dienen, wenn sie durch einen Metallbügel verbunden werden, dazu, um von der rotierenden Scheibe, falls diese an die Pergamentspitzen d, resp. c ihre positive, resp. negative Elektrizität nicht vollständig abgegeben haben sollte, die zurückgebliebenen Reste aufzusaugen und auszugleichen.



660. Influenz-Elektrisiermaschine von Holtz. (Vorderansicht.)



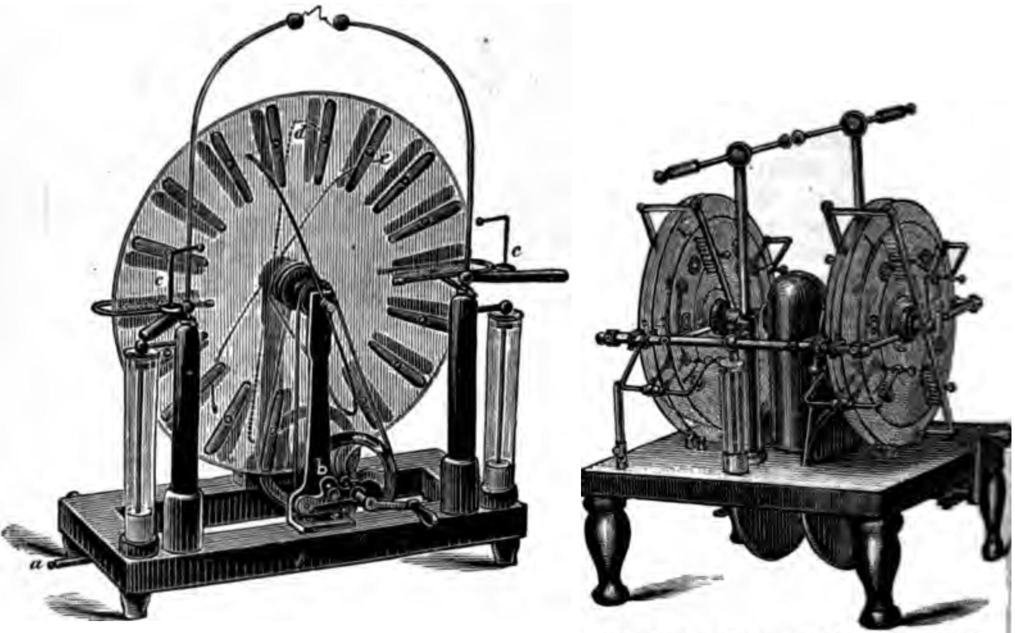
661. Influenz-Elektrisiermaschine von Holtz. (Hinteransicht.)

Töpler hat **selbsterregende Influenzmaschinen** konstruiert, bei welchen auf der rotierenden Glasscheibe äquidistante Metallbelegungen angebracht sind, welche bei der Rotation an Metallpinseln vorbeistreichen. Die durch diese Reibung erzeugte Elektrizität genügt zum Erregen der Maschine. Er hat sehr große Maschinen dieser Art mit sechs festen und sechs rotierenden Scheiben hergestellt. Abb. 662 zeigt eine Töplersche Maschine mit vier festen und vier rotierenden Scheiben, während

Abb. 663 eine Wimshurstsche Influenzmaschine darstellt, welche zwei in entgegengesetzter Richtung rotierende Scheiben besitzt; diese tragen auf den einander abgewandten Seiten speichenförmige Belegungen, welche bei der Rotation an Metallpinseln vorbeistreichen.

Elektrische Versuche. Mittels der Elektrisiermaschine und der Leydener Flasche ist man im stande, eine große Zahl interessanter Versuche anzustellen. Bekannt ist das elektrische Glockenspiel, der elektrische Kugel- und Puppentanz und ähnliche Versuchsanordnungen, welche darin bestehen, daß zwischen zwei, mit verschiedenen Elektrizitäten geladenen Platten leichte Körperchen angezogen und abgestoßen werden.

Andere Versuche und Apparate beruhen auf den Licht- und Wärmeerscheinungen des elektrischen Funkens: Die Blitztafel (Abb. 664) ist eine mit Stanniolstückchen mosaikartig belegte Glastafel; die Zwischenräume zwischen den kleinen Metallblättchen geraten dadurch, daß Funken über die Tafel hinweggeleitet werden, ins Leuchten, und man vermag so beliebige, strahlende Muster zu erzeugen. In ähnlicher Weise sind die Blitzröhren eingerichtet: Auf einer mit metallenen Enden versehenen Glasröhre ist eine zum Teil unterbrochene Spirallinie aus Stanniol aufgeklebt.

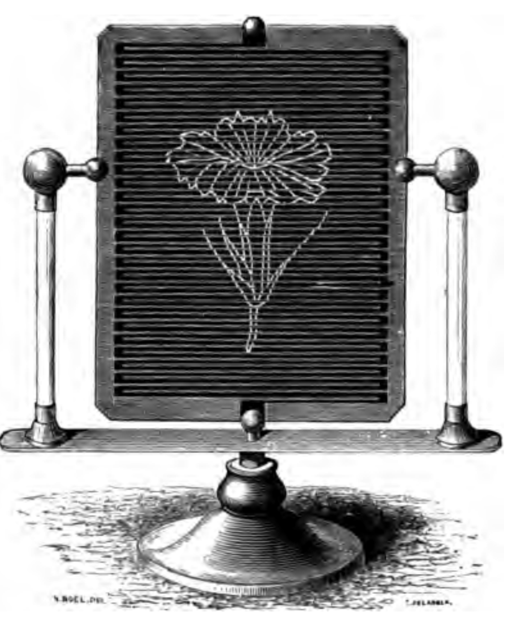


662. Töplers selbsterregende Influenzmaschine. 663. Wimshursts selbsterregende Influenzmaschine.

Die sogenannten Quecksilberröhren sind luftleer gemachte Glasröhren, welche sternförmig um eine Achse angebracht sind und im Inneren etwas Quecksilber enthalten. Versetzt man sie um die Achse in Rotation, so fallen die Quecksilberkügelchen an den Glaswänden herab und erregen dabei durch Reibung Elektrizität, welche den luftleeren Raum mit einem magischen Lichtblitz erfüllt.

Füllt man eine mit zwei Drahtenden versehene Röhre mit einem Gemisch von Wasserstoff- und Sauerstoffgas, so kann man dies dadurch, daß man zwischen den Drähten im Inneren einen elektrischen Funken überschlagen läßt, entzünden und mit Gewalt eine Kugel aus der Röhre herausschießen. Diese sogenannte elektrische Pistole ist im großen Maßstabe in der Lenoirschen Gasmaschine nachgeahmt worden. In derselben Weise kann man Schießpulver entzünden; hiervon wird in der Praxis beim Sprengen großer Felsmassen Gebrauch gemacht. Durch die vom elektrischen Funken erzeugte Wärme wird beim elektrischen Mörser (Abb. 665), bei dem der Funke zwischen T und T' überschlägt, eine abgeschlossene Luftmenge so ausgedehnt, daß sie die absperrende Kugel B fortschleudert.

Sehr intensive Wirkungen lassen sich durch Entladung einer Leydener Flasche oder einer Batterie von Leydener Flaschen erzielen. Starke Papptafeln werden von einem solchen Funken durchschlagen, dicke Glasscheiben durchbohrt, wenn man die in Abb. 666 dargestellte Versuchsanordnung wählt. Die zu durchbohrende Glasscheibe wird zwischen die beiden Spitzen T und T', die sich möglichst nahe stehen müssen, gebracht. Nähert man alsdann die innere Belegung A der stark geladenen Flasche dem Knopfe B, bis der Funke zwischen ihnen überspringt, so durchschlägt er leicht die zwischen T und T' befindliche Glasplatte. Metallene Drähte können durch starke Funken zu lebhaftem Glühen, dünnere zum Schmelzen gebracht werden, feine Platin- oder Silberdrähte verbrennen mit blendendem Lichte und zerstieben wie Nebel in der Luft. Daß solche Wirkungen auch den Nerven sehr fühlbar werden müssen, braucht wohl kaum noch besonders betont zu werden. Während der Funke aus einem Konduktor nur einen prickelnden Reiz verursacht, kann die Entladung einer starken elektrischen Batterie einen Menschen augenblicklich betäuben, ja noch gefährlicher wirken, so daß man, wenn man mit starken Batterieen experimentiert, darauf achten muß, daß der Körper nie in den Schließungskreis zwischen der inneren und der äußeren Belegung eingeschaltet wird.



664. Blitztafel.

Sehr interessante, auf der Spitzenwirkung beruhende Versuche sollen hier noch erwähnt werden, die der englische Physiker Lodge in neuerer Zeit mit der Influenzmaschine ausgeführt hat, um mittels deren Elektrizität den Rauch zu kondensieren, und welche mittels des durch Abb. 667 dargestellten Apparats demonstriert werden können. Durch die Durchbohrungen A und B eines Glascylinders sind zwei mit Spitzen versehene Elektrizitätsausstrahler geführt. Der Glascylinder ruht auf einer in der Mitte mit einer Öffnung versehenen Grundplatte über dem Raucherzeuger C und hat oben ein Abführungsrohr D, um den nötigen Luftabzug zu haben. Erzeugt man nun dadurch, daß man brennenden Feuerschwamm oder Salpeterpapier u. s. w. in den Raucherzeuger legt, in dem Glascylinder Rauch, verbindet alsdann die Elektroden A und B mit den Polen einer selbsterregenden Influenzmaschine und setzt diese in Thätigkeit, so beobachtet man bald ein Aufwirbeln des Rauches und ein Verschwinden, d. h. eine Kondensation desselben. Das Verfahren wird vielfach in Bergwerken zur Kondensierung des Hüttenrauchs angewandt.

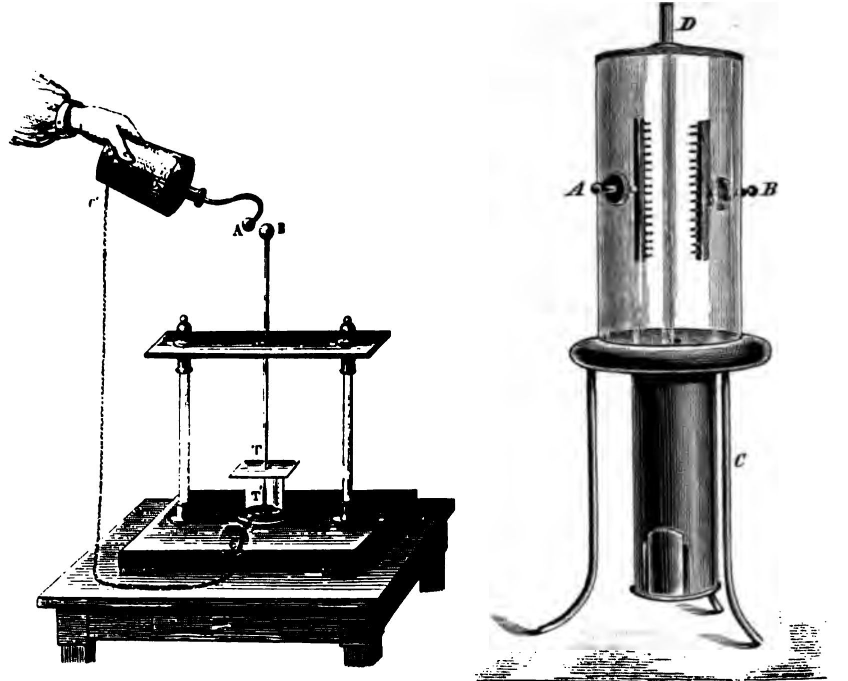
Der Blitz. Unter allen Naturerscheinungen haben Blitz und Donner von jeher auf die Einbildungskraft der Völker einen mächtigen Einfluß ausgeübt und sind meistens als dämonische Äußerungen göttlichen Willens aufgefaßt worden. **Jupiter tonans** regiert die Welt, und der Blitz ist ein Zeichen seiner Kraft. Eine naive Naturauffassung begnügt sich damit, alle Erscheinungen auf den Willen der Gottheit zurückzuführen, sie fragt nicht nach anderen Ursachen der Erscheinungen, sondern erträgt deren schädliche Wirkungen als eine Schickung mit demütiger Ergebung. Mit dem Entstehen der Naturwissenschaften machte sich das Bedürfnis nach einer natürlicheren Erklärung fühlbar. Freilich blieben noch sehr lange Zeit die Auffassungen und Erklärungsversuche für das Gewitter unzureichend.



665. Elektrischer Mörser.

Boerhave und Muschenbroek hielten noch den Blitz, ähnlich wie schon Aristoteles, für eine Entzündung in der Luft schwebender, öliger und schwefliger Dünste, denen Salpeter beigemengt sei. Descartes selbst meinte, daß der Blitz eine Lichterscheinung sei, die durch gewisse Zusammenziehungen von Wolkenpartieen entstehe, mit denen eine große Wärmeentwickelung notwendig verbunden sein müsse; der Donner aber entstehe dadurch, daß Wolkenmassen aus großer Höhe plötzlich auf niedriger liegende Wolken herabstürzen. Mit der Erfindung der Elektrisiermaschine und infolge der mit ihr angestellten Versuche gewann man indessen bald Gesichtspunkte, die die bisherigen Erklärungsversuche unzulänglich erscheinen ließen.

Der englische Physiker Wall war wohl der erste (1708), welcher dem Lichtfünkchen und dem Knistern, das beim geriebenen Bernstein zu beobachten ist, eine gewisse Ähn-



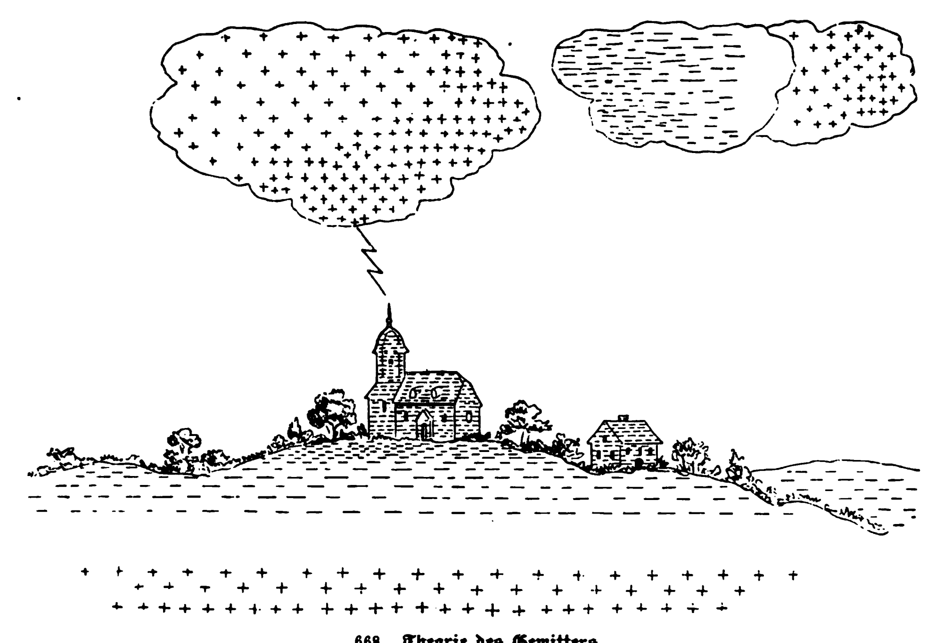
666. Durchbohren von Glas mittels des Funkens einer Leydener Flasche.

667. Lodges Apparat zur Kondensierung des Rauchs.

lichkeit mit Donner und Blitz zuschrieb. Gray und Nollet und später Winkler in Leipzig behaupteten entschieden die Identität der Erscheinung und erklärten, daß der einzige Unterschied zwischen dem aus dem Konduktor der Elektrisiermaschine gezogenen Funken und dem Blitz in der relativen Stärke beider bestehe. Den thatsächlichen Beweis für das Behauptete aber führte Benjamin Franklin, der große amerikanische Bürger, durch direkte Versuche. Er holte mit Hilfe eines Papierdrachens, den er gegen eine Gewitterwolke aufsteigen ließ, die Elektrizität aus dieser herab, indem er die Schnur leitend machte, und experimentierte mit der aus den Wolken gewonnenen Elektrizität genau so wie mit der durch Umdrehung einer Glasscheibe erhaltenen, und weil wegen der größeren Elektrizitätsmenge, die er auf seinem neuen Wege erhielt, die Experimente glänzender als früher ausfielen, so wurden die Franklinschen Versuche bald von allen Seiten, von den Gelehrten wie von der Laienwelt, wiederholt, und haben leider auch in jener Zeit durch die unberechenbare Gewalt der elektrischen Kräfte manches beklagenswerte Opfer gefordert. So wurde z. B. der Physiker Richmann in Petersburg, ein erfahrener und vorsichtiger Experimentator, bei seinen Versuchen von einem aus der Leitung zuckenden Blitzstrahl erschlagen.

Der Blitz ist nichts anderes als ein elektrischer Funke, ein großartiger, in der Luft vor sich gehender, elektrischer Ausgleich.

Die Atmosphäre besitzt stets eine, wenn auch schwache Ladung von Elektrizität. Die Entstehungsursache dieser atmosphärischen Elektrizität ist noch nicht aufgeklärt, ebenso wenig wie die direkte Entstehung des Gewitters. Wir müssen uns vorläufig mit der Thatsache begnügen, daß durch die mannigfachen, in unserer Atmosphäre unaufhörlich sich abspielenden Vorgänge, z. B. bei der Verdampfung und Kondensation des Wassers, bei den chemischen Prozessen im Pflanzenleben, dem Wechsel der Temperatur, sowie der Richtung und Stärke der Winde in bisher noch unaufgeklärter Weise große Mengen von Elektrizität erzeugt werden, welche durch den aufsteigenden Wasserdampf mit emporgeführt und allmählich in den Wolken angesammelt werden. In der Regel verhält sich das luftelektrische Kraftfeld so, als wenn die Erde mit negativer Elektrizität geladen wäre. Eine solche, mit Elektrizität geladene Wolke wirkt gleich einem mit Elektrizität geladenen Konduktor influenzierend auf die unter ihr befindlichen Körper (die Erde), stößt deren gleich-



668. Theorie des Gewitters.

namige Elektrizität ab und zieht die ungleichnamige an, welche sich in den der Wolke zunächst gelegenen höheren Stellen, den Gipfeln der Bäume, Dachfirsten, Turmspitzen u. s. w. ansammelt. Zwischen Wolke und Erde besteht also eine Spannung, wie zwischen zwei geladenen Konduktoren, die mit ungleichnamigen Elektrizitäten geladen sind, welche das Bestreben haben, sich anzuziehen, während die dazwischen befindliche Luft als Isolator die Vereinigung hindert. Dieses Hindernis wird aber überwunden, wenn die Spannung, sei es dadurch, daß die Wolke sich stärker ladet, oder der Erde näher rückt, genügend groß ist, um den Isolator zu durchbrechen, alsdann erfolgt die Ausgleichung in Gestalt eines zur Erde niederfahrenden Blitzes (Abb. 668).

In jüngster Zeit hat der französische Meteorolog Marcel Brillouin eine Erklärung für die Entstehung der atmosphärischen Elektrizität gegeben, indem er von der wissenschaftlichen Thatsache ausgeht, daß jeder mit negativer Elektrizität geladene metallische Körper seine Ladung verliert, wenn er der Bestrahlung durch ultraviolettes Licht ausgesetzt wird. Nach Versuchen von Brillouin verhält sich nämlich trockenes Eis, wenn es mit negativer Elektrizität geladen ultravioletten Strahlen ausgesetzt wird, ebenso wie ein Metall, verliert also auch seine negative Elektrizität, während dies nur in sehr

beschränktem Maße und sehr langsam der Fall ist, wenn sich auf dem Eise Wasser befindet. Nun bestehen die in großer Höhe der Atmosphäre schwebenden Zirruswolken aus Eisnadeln. Werden diese von der Sonne, welche ultraviolette Strahlen reichlich aussendet, beschienen, so müssen sie ihre Elektrizität an die Luft abgeben. Ihre Elektrizität sollen die Zirruswolken nach Brillouin durch Einwirkung des Erdmagnetismus erhalten.

Wie auf die Erde, so wirkt eine stark geladene Wolke auch influenzierend auf andere Wolken, und da die Wolken sich leicht einander nähern können, so wird auch ein Ausgleich von Wolke zu Wolke leichter und häufiger stattfinden als zwischen Wolken und Erdboden. Bisweilen geht der Ausgleichungsprozeß in ganz ruhiger Weise vor sich, so daß nur Gestalt und Dichtigkeit der Wolken sich verändern, und die eine oder andere auch wohl ganz aufgelöst wird. Häufig aber, bei starker elektrischer Spannung und trockener Luft erfolgen die Entladungen in Form eines Gewitters, das die Wolken unter sich ausfechten, ohne daß ein Blitz zur Erde fährt. Die dabei auftretenden elektrischen Funken können von enormer Länge sein; man will beobachtet haben, daß Blitze über Räume von 70 und mehr Kilometer hinwegschlagen.

Fast alles, was wir über das Gewitter wissen, verdanken wir Benjamin Franklin, welcher als das fünfzehnte Kind einer Familie von siebzehn — am 17. Januar 1706 zu Boston geboren wurde; sein großes Genie zeigte sich schon sehr frühzeitig, die Resultate seiner vielseitigen Forschungen wurden aber erst in den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts Allgemeingut der Menschheit.

Im Jahre 1748 sprach er es aus, daß das Gewitter nichts anderes als die Ausgleichung zweier entgegengesetzter Elektrizitäten, der Blitz ein mächtiger elektrischer Funke sei, welcher, wenn er gut leitende Körper treffe, auf seinem Wege keine zerstörenden Wirkungen ausübe, der jedoch beim Überschlagen durch Isolatoren von einem Leiter zum anderen Zertrümmerungen, Entzündungen und Schmelzungen hervorrufen könne. Die Wahrnehmung, daß der Blitz vorzugsweise spitze Hervorragungen, wie Türme, Masten, Bäume u. s. w. trifft, führte Franklin auf den kühnen Gedanken, zu versuchen, ob sich nicht die Elektrizität aus einer Wetterwolke zur Erde leiten lasse, und so stellte er denn jenes berühmte Experiment an, dessen Lebensgefährlichkeit er freilich nicht ahnte. Er befestigte am oberen Ende eines großen, aus Seidenstoff gefertigten und über ein Gestell gespannten Drachens eine eiserne Spitze. Die Leine, an welcher der Drachen aufstieg, war ein hanfener Bindfaden, welcher sich in eine seidene Schnur fortsetzte, an deren Ende ein Stahlschlüssel als Handgriff hing. So ausgerüstet ging Franklin an einem Sommertage des Jahres 1752, nur von seinem Sohne begleitet, beim Herannahen eines Gewitters auf eine nahe bei Philadelphia gelegene Wiese und ließ den Drachen steigen. Obwohl nun dieser hoch stand, und die Gewitterwolken dicht über ihn hinzogen, bemerkte Franklin keine Spur von Elektrizität, und schon fürchtete er, sich in seiner Ansicht von der Natur des Gewitters getäuscht zu haben, als er, nachdem der Faden infolge eines gelinden Regens angefeuchtet war, plötzlich zu seiner größten Freude wahrnahm, daß die einzelnen Fäserchen der seidenen Schnur aufwärts strebten, gerade so, als wenn sie an dem Konduktor der Elektrisiermaschine hängen würden. Und als er hocherfreut über diese offenbaren Anzeichen von aus den Gewitterwolken herabgeleiteter Elektrizität sein Fingergelenk an den Stahlschlüssel hielt, da sprang ein starker, elektrischer Funke auf seinen Körper über. Die Luftelektrizität wirkte also in gleicher Weise wie die künstlich erzeugte. Zum Glück war die Schnur feucht genug, um einen guten Leiter zu bilden, sonst hätte der Versuch Franklin leicht das Leben kosten können. Um bequemer experimentieren zu können, stellte dann Franklin an seinem Hause eine isolierte eiserne Stange auf und versah sie an dem unteren Ende mit zwei Glöckchen; diese schlugen an, so oft die Luft eine genügend große elektrische Spannung besaß. Später gelang es ihm leichter, eine Leydener Flasche mit Luftelektrizität zu laden und mit dieser zu operieren.

Die Franklinschen Versuche, auf Grund deren die Oxforder Universität den amerikanischen Bürger 1762 zum Doktor promovierte, wurden bald vielfach wiederholt und in zweckmäßiger Weise abgeändert. Ein Franzose de Romas z. B. band seinen Drachen an eine mit einem Metalldrahte durchflochtene Schnur, an welcher er unten, um sich vor

den Wirkungen des Blitzes zu schützen, eine mehrere Meter lange Seidenschnur befestigte. Den Funken entlockte er nicht mit dem Finger, sondern mittels eines mit einem isolierten Handgriffe versehenen und mit der Erde durch eine eiserne Kette verbundenen Metallleiters. Der Drache stieg 180 m hoch und passierte Luftschichten, welche sehr stark mit Elektrizität geladen sein mußten; denn binnen einer Stunde erhielt de Romas unter pistolenähnlichem Knattern 30 Feuerstrahlen, deren jeder eine Länge von fast 3 m hatte. Durch so glänzende Erfolge wurde die Franklinsche Anschauung von der Natur des Gewitters allgemein anerkannt.

Abb. 669 stellt einen Teil einer im Juli 1884 von Prof. Kayser aufgenommenen Photographie eines eigentümlichen Blitzstrahls dar. Der Hauptstrahl besteht aus vier parallel neben einander liegenden Strahlen: links der stärkste Strahl, an den sich rechts ein helles breites Band anschließt; dann folgen zwei dicht neben einander verlaufende Strahlen und nach einem größeren Abstande ein vierter Strahl. Wahrscheinlich ist diese vielfache Strahlenform die Folge einer oscillierenden Entladung, bei welcher in sehr kurzen Zwischenräumen Entladungen in entgegengesetzter Richtung verlaufen. Nach dieser Erklärung würde der erste Funke auf seinem Wege einen Kanal erhitzter Luft hinterlassen, der nächste, von der Erde zur Wolke gehende Funke würde denselben Kanal benutzen, der im wesentlichen noch besteht und nur durch den Wind etwas verschoben ist, u. s. w. Von den vier Teilen des Blitzes geht eine größere Anzahl schwächerer Seitenentladungen aus, die sich zum Teil noch weiter verzweigen.



669. Photographie eines Blitzstrahls.

Der Donner beim Gewitter erklärt sich einfach durch die Schwingungen der gewaltsam erschütterten Luft. Wenn der Blitz die Atmosphäre durchzuckt, erhitzt er die von ihm getroffenen Luftteilchen so ungeheuer, daß sie sich plötzlich auf das Vieltausendfache ihres früheren Volumens ausdehnen, gleich darauf aber wieder, wenn die Wärme sich verteilt, in sich zusammenstürzen. Es wirkt also dieselbe Ursache wie etwa beim Flintenschuß, und die Reflexion des Schalls an den verschiedenen Wolkenschichten, Bergen und Wäldern ruft das Echo und das allmählich verhallende Geräusch des Donners hervor. Da der Schall sich langsamer fortpflanzt als das Licht, so sehen wir den Blitz früher und auf einmal in seiner ganzen Länge, während der Donner unser Ohr erst später und von den entfernteren Punkten des oft viele Meilen langen Funkens nur nach und nach erreicht. Ohne uns nach dem Gewitter umzusehen, hören wir sein Nahen an dem Donner, sobald er stärker und stärker wird. In der Nähe des Ortes, wo es einschlägt, vernimmt man bekanntlich gleichzeitig mit dem Blitz einen einzigen prasselnden Schlag; ist das Gewitter entfernt, so liegt je nach der Entfernung eine um so längere Pause zwischen Blitz und Donner.

Der Donner ist uns ein bequemes Mittel, zu beurteilen, wie weit ein Gewitter von uns entfernt ist. Denn da Blitz und Donner gleichzeitig auftreten, die Fortpflanzung des Lichts für irdische Entfernungen als eine momentane betrachtet werden kann, der Schall aber in der Sekunde im Mittel nur 330 m zurücklegt, so brauchen wir nur die Zahl der Sekunden, welche zwischen Blitz und Donner vergehen, mit 330 zu multiplizieren, um die Entfernung des Gewitters in Meter kennen zu lernen.

Von den Donnerkeilen, die man in manchen Gegenden nach heftigen Gewittern und Regengüssen an Berghalden oder in Thalgründen findet, nahm man früher an, daß

sie zugleich mit dem Blitz in die Erde geschleudert würden. Seit man aber jene länglich runden und vorn zugespitzten Steinbildungen auch in geschichteten Gesteinen eingebettet gefunden hat, weiß man, daß es Versteinerungen vorweltlicher, schneckenartiger Tiere sind, und weit entfernt, ihren Ursprung über unseren Häupten zu suchen, hat die Geologie die Geburtsstätte dieser Belemniten vielmehr in der Tiefe schlammabsetzender Meeresbecken erkannt.

Wirkung des Blitzes. Die Erhitzung durch den Blitz wächst mit der Größe des Widerstandes, der sich ihm auf seinem Wege bietet. In den oberen Regionen der Atmosphäre, in denen die Luft sehr verdünnt ist, so daß sie dem Ausgleich der Elektrizitäten nur einen geringen Widerstand entgegensetzt, erfolgt das Blitzen als ein geräuschloses Wetterleuchten, während in den tieferen Luftschichten die Luft infolge ihres größeren Widerstandes mit Gewalt durchbrochen werden muß. Findet der Blitz einen gutleitenden Körper von großem Querschnitt, so fährt er an demselben herab, ohne merkliche Spuren zu hinterlassen; trifft er aber auf dünne Drähte oder gar auf trockene, harzige Hölzer, so erhitzt er sie bis zum Schmelzen, beziehungsweise Entzünden.

Leicht können aber auch dicke Eisenstangen durch den hindurchgehenden Funken geschmolzen, weniger gut leitende Körper vollständig zertrümmert werden. Mit der großen Wärmeentwickelung hängen die enormen mechanischen Wirkungen zusammen, welche durch Blitzschläge ausgeübt werden. Wenn der Blitz in einen Baum fährt, so sucht er seinen Weg vorzugsweise zwischen Rinde und Holz in dem feuchten Splinte; das Wasser wird plötzlich in Dampf verwandelt, und dadurch erklärt sich die außerordentliche Zerreißung und Zersplitterung, welche vom Blitz getroffene Bäume aufweisen.

Derselbe Blitz, welcher die dicke Stange eines Blitzableiters nur mäßig erwärmt, schmilzt die Vergoldung von Bilderrahmen, über welche er hinwegfährt, vollständig ab. Humboldt erzählt in seinem „Kosmos“, daß er auf seinen Reisen in Südamerika, wo allerdings die Gewitter mit einer bei uns unbekannten Heftigkeit wüten, Felsen angetroffen habe, welche auf der Oberfläche vom Blitze verglast waren. Die Blitzröhren, die man häufig in ebenen, sandigen Gegenden findet, und oft in einer Länge von mehr als 12 m in einer Richtung oder in Äste verzweigt unter der Oberfläche des Bodens verfolgen kann, bestehen aus Sand und Bodenteilen, welche von dem einschlagenden Blitze geschmolzen und zu röhrenförmigen Gebilden mit einander verkittet sind.

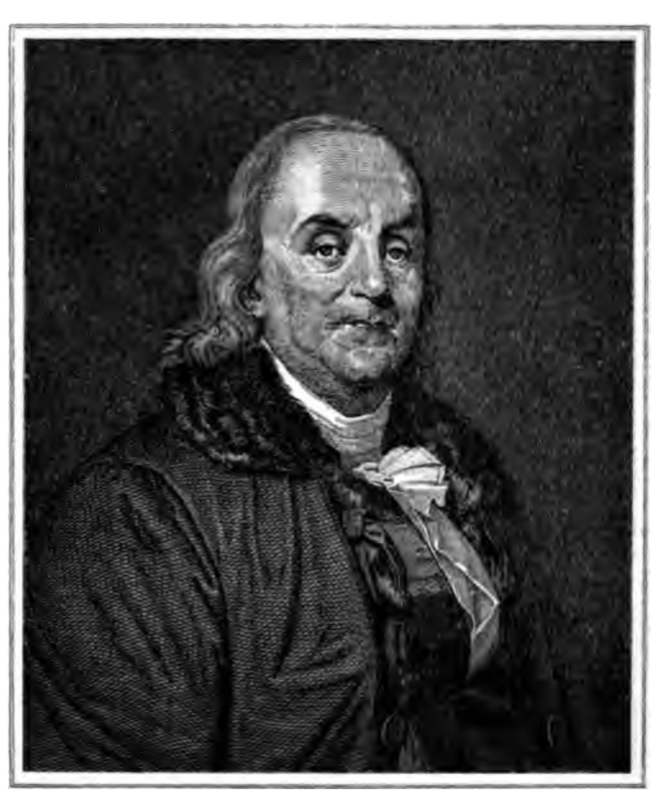
Gewaltige mechanische Wirkungen bringt häufig der Blitz hervor. In der Nähe von Manchester fuhr am 2. August 1809 ein Blitzstrahl zwischen einem Keller und einer Zisterne in die Erde und verschob eine Mauer von 1 m Dicke und 4 m Höhe, so daß der weggeschobene Teil an einer Seite mehr als 1 m, an der anderen 3 m abstand, wobei alle hölzernen Verbindungsstücke zertrümmert wurden. In dem bewegten Mauerstück befanden sich 7000 Backsteine mit einem Gesamtgewicht von 26000 kg.

Daß durch das Einschlagen des Blitzes in die Masten von Schiffen die Kompaßnadel vollständig ummagnetisiert worden ist, ist eine nicht selten beobachtete Erscheinung.

Blitzableiter. Manche Thatsachen scheinen dafür zu sprechen, daß man schon im Altertum bestrebt gewesen ist, Schutzvorrichtungen gegen die verheerenden Wirkungen des Blitzes zu treffen. Hohe, eherne Bildsäulen sollen zu Zeiten des Numa Pompilius und Tullus Hostilius aufgestellt worden sein, um Funken herabzuziehen. Von den alten Indern erzählt Ktesias, daß sie sich eines gewissen Eisens bedient hätten, welches von ihnen zur Ableitung zündender Blitze aufgerichtet worden wäre. Zu Karls des Großen Zeiten soll es Sitte gewesen sein, in den Feldern hohe Stangen zur Ableitung von Hagelwettern aufzurichten, was jedoch von dem großen Kaiser selbst als abergläubisch verpönt war.

Wir haben schon früher (S. 507 u. 517) gesehen, daß die Verteilung und Dichte der Elektrizität wesentlich von der Oberflächenform der Leiter abhängt, daß sie insbesondere an spitzen Stellen dichter ist wie an abgerundeten, und daß sie daher von ersteren leichter ausströmt, was wir im Dunklen leicht beobachten können. Wir haben bei der Elektrisiermaschine von der Spitzenwirkung gesprochen. Sie bildete auch die Ursache einer merkwürdigen Naturerscheinung, deren Erklärung lange Zeit große Schwierigkeiten darzubieten schien, der sogenannten St. Elmsfeuer.

An schwülen Abenden beobachtet man bisweilen über den Spitzen von Blitzableitern, über Turmknöpfen, an Ecken von metallenen Dachrinnen kleine blaue Flämmchen, welche nach einiger Zeit von selbst wieder verschwinden, wie sie entstanden. Besonders häufig zeigt sich die Erscheinung auf den Mastspitzen der Schiffe, und sie galt bei den alten Griechen und Römern für ein Zeichen des baldigen Aufhörens des Sturms. Zwei Flämmchen, Kastor und Pollux, waren glückbringend, ein einziges, Helena, galt für verderblich. Aus dem letzten Namen soll die Bezeichnung St. Elias, Elmen und Elmsfeuer entstanden sein. Bei sehr starker Luftelektrizität brauchen übrigens die Spitzen gar nicht hoch über den Erdboden empor zu ragen; man hat Flämmchen auf den Köpfen von Statuen, auf den Lanzen von Soldaten, auf den Hüten von Wanderern u. s. w. bemerkt. Für uns hat das Phänomen nichts Rätselhaftes mehr; es ist das Ausströmen und Ausgleichen von Elektrizitäten auf stille, friedliche Weise in einem elektrischen Gleichgewichtszustande, welcher durch den Blitz nur unter gewaltsamen Aktionen herbeigeführt werden kann.


670. Benjamin Franklin.

Der Blitzableiter hat nun denselben Zweck, und sein genialer Erfinder hat ihn in richtiger Erkenntnis jener Naturerscheinung auf die Spitzenwirkung gegründet.

Kaum dürfte eine Erfindung bei ihrem Auftauchen die ganze gelehrte und nichtgelehrte, fromme und profane Welt so in Aufregung versetzt haben, wie die Franklins. Man fühlte ihre ungeheure Bedeutung — aber der Glaube kam mit der Wissenschaft in Konflikt; der entstehende Kampf dauerte lange und hinderte die segensreiche Einführung. Es erschien vermessen, dem lieben Gott ein so bequemes Züchtigungsmittel wie den Blitz aus der Hand winden zu wollen.

Es war im Jahre 1760, als Franklin den ersten Blitzableiter, der sich im wesentlichen in nichts von unseren heutigen unterschied, auf dem Hause des Kaufmanns West in Philadelphia errichten ließ: ein eiserner Stab von 3 m Länge und 27 mm im Durchmesser war, von dem Gebäude durch schlechte Leiter isoliert, mittels einer metallenen Zuleitung mit der Erde verbunden worden. Frankreich und England verhielten sich lange Zeit hindurch ablehnend gegen die neue Erfindung. Erst gegen das Jahr 1788 wurden Blitzableiter auf den Masten englischer Schiffe errichtet. Ehe sie auf Gebäuden angebracht wurden, verging noch eine geraume Zeit.

Von besonderem Einfluß auf die Einführung wurde die Stimme des berühmten schweizerischen Physikers Saussure, welcher im Jahre 1771 auf seinem Hause in Genf einen Blitzableiter hatte errichten und, um die darüber entsetzten, gottesfürchtigen Gemüter zu beruhigen, eine Broschüre über die Nützlichkeit der Elektrizitätsleiter hatte drucken

und gratis verteilen lassen. Von der amerikanischen Regierung wurde die Franklinsche Idee auf das energischste unterstützt. Philadelphia hatte im Jahre 1782 auf seinen 1300 Häusern schon über 400 Blitzableiter; alle öffentlichen Gebäude, mit Ausnahme des Hotels der französischen Gesandtschaft, waren damit versehen. Und gerade in dieses Haus schlug am 27. März 1782 der Blitz. Er tötete einen Offizier, und nun ließ der Gesandte Frankreichs sein Palais mit der Schutzvorrichtung versehen.

In Frankreich selbst erhoben zwar der Abbé Nollet und de Romas ihre Stimmen zu gunsten Franklins, aber erst im Jahre 1784 wurden daselbst Blitzableiter zum Schutze der Pulvermagazine und einiger öffentlichen Gebäude eingeführt.

Die Republik Venedig hatte schon im Jahre 1778 ihre Marine mit dem neuen Wetterschutz versehen. Friedrich Wilhelm II. von Preußen ordnete im ganzen Umfange seiner Staaten die Errichtung von Blitzableitern an, verbot aber merkwürdigerweise ausdrücklich, auf dem Schlosse Sanssouci einen solchen anzubringen.

Der Blitzableiter besteht aus drei Teilen: der Auffangestange mit der Spitze, der zur Erde führenden Leitung und der Versenkungsvorrichtung der letzteren. Als Auffangestange wählt man eine starke, konisch nach oben sich verjüngende, eiserne Stange mit vergoldeter oder platinierter Kupferspitze. Häufig werden noch zwei, drei und mehr einfache oder lanzenförmige Spitzen auf einer und derselben Auffangestange angebracht. Kugeln anstatt der Spitzen auf den Auffangestangen anzubringen, damit sie dem Blitze eine größere Oberfläche darböten, ist unzweckmäßig, denn der Blitzableiter soll nicht den Blitz anziehen, vielmehr soll er durch unausgesetzte Ausstrahlung der Erdelektrizität die in der Luft vorhandene Elektrizitätsmenge neutralisieren, also nicht durch eine einmalige Ableitung schützen, sondern durch fortwährende Wirkung das elektrische Gleichgewicht wieder herstellen. Wenn ein Gewitter über Wälder mit spitz emporragenden Bäumen zieht, findet gewöhnlich ein Ausgleich der Elektrizitäten statt, ohne daß es einzuschlagen braucht. Wie hier jeder einzelne Baum wirkt, soll in verstärktem Maße jeder Blitzableiter wirken.

Die Auffangestange IP (Abb. 671) ist der Teil, welcher sich vom Dache des Gebäudes in die Luft erhebt. Der Querschnitt der Auffangestange richtet sich nach ihrer Höhe, welche etwa 3—6 m beträgt. Am unteren Teile I, da, wo die Auffangestange auf dem First des Hauses aufsteht, hat sie zum Abfluß für das Regenwasser ein kleines Regendach, um die Befestigung im Gebälk trocken zu halten. Nach der gewöhnlichen Annahme soll eine Auffangestange einen Umkreis von 12—16 m Durchmesser schützen; ein Gebäude von 20 m Länge soll daher mindestens zwei, ein noch größeres nach Verhältnis seiner Dimensionen mehr Auffangestangen erhalten.

Eine von der französischen Regierung zur Untersuchung der Blitzableitungsfrage eingesetzte Kommission, welcher unter anderm Arago, Biot, Poisson, Girard, Fresnel, Gay-Lussac angehörten, gelangte auf Grund eingehender Untersuchungen zu dem Ergebnis, daß ein Blitzableiter mit zugespitzter Auffangestange um sich her einen kreisförmigen Raum, dessen Radius gleich der doppelten Höhe der Stange ist, noch zu schützen vermöge, und gründete darauf Vorschläge für die Anlage von Blitzableitern, denen zufolge die hervorspringenden Teile des Daches, Schornstein, Ecken u. s. w. durch Blei- oder Kupferstreifen mit einander und dann mit einer zur Erde führenden Hauptleitung zu verbinden seien. Wetterfahnen, Stangen, welche den Stern oder Knopf auf Türmen tragen, lassen sich, wenn sie nicht zu weit in das innere Gebälk hineinragen und den Glocken nicht zu nahe kommen, ohne weiteres als Auffangestangen benutzen.

Die Leitung IC, welche dazu dient, die Auffangestange mit der Erde in metallische Verbindung zu setzen, wählt man am besten aus einem ununterbrochen gleichmäßigen, starken Kupferseil. Die Hauptanforderung ist, daß sie nirgends unterbrochen, an keiner Stelle zu schwach oder gar schadhaft sein darf, damit sie dem Funken eine sichere und bequeme Bahn bietet, um in die Erde zu gelangen. Wenn mehrere Stangen vorhanden sind, so sind sie unter einander zu verbinden und durch eine Hauptleitung abzuführen. Die Dicke der Leitung muß der Stärke der Auffangestangen entsprechend gewählt werden, um ein gleichmäßiges Abströmen der Elektrizität zu ermöglichen. Die in die Erde

geführte Leitung läßt man 1—2 m unter der Oberfläche vom Hause etwa bei A bis B abbiegen und versenkt sie am sichersten in einen Brunnen B E, oder wenn dies nicht angeht, jedenfalls so tief in das Erdreich, daß sie beständig in feuchter Erdschicht liegt. Eine eiserne Leitung ist durch Anstrich möglichst vor Rost zu schützen. Eine von Rost angefressene Stelle birgt die Gefahr, daß der Blitz abspringt und irgend einen bequemeren Weg zur Erde einschlägt, auf welchem er dann leicht durch Zündung oder Zertrümmerung Schaden stiftet. Daher ist es notwendig, die Leitung, als den wichtigsten Teil am Blitzableiter, von Zeit zu Zeit einer genauen Prüfung zu unterwerfen, um etwa entstandenen Schäden sofort abhelfen zu können. Die Führung über das Dach und am Gebäude entlang bewerkstelligt man am sichersten durch isolierende Träger. Indessen ist dies nur notwendig, wenn die Leitung nahe an großen, im Innern des Gebäudes liegenden Metallmassen vorüber geführt wird. Zu empfehlen ist es, mit der Leitung in leitende Verbindung zu setzen metallene Dachrinnen, eiserne Dachkonstruktionen, eiserne Säulen, Gas- und Wasserleitungen (die Gas- und Wassermesser sind hierbei durch starke Kupferseile zu überbrücken), ferner Ecken und Firsten, welche durch ihre hervorspringende Form den Blitz anziehen könnten. Die in Abb. 671 mit M bezeichneten Gebäudeteile sind solche mit der Leitung zu verbindende Stellen.



671. Führung der Leitung.

Den dritten Teil der Blitzableitung bildet die Versenkungsvorrichtung. Da die Wirksamkeit der ganzen Einrichtung davon abhängt, wie rasch die Elektrizität aus dem Erdboden durch die Leitung in die Spitze der Auffangestange und aus dieser in die gewitterschwangere Luft und andererseits im Fall des Einschlagens aus der Leitung in den Boden abströmen kann, muß das Ende der Leitung in feuchtem Erdreich liegen; denn die zahllosen, feinen Wasseradern, die den Boden durchziehen, sind ebensoviel leitende Äste, in denen sich der Blitzstrahl verzweigt, oder welche die neutralisierende Elektrizität herbeiführen. Wollte man die Leitung in trockenem, sandigen Erdreich plötzlich abbrechen, so würde der Blitzableiter eher eine Gefahr, als ein Schutz für das Gebäude sein. Am zweckmäßigsten ist es, die Ableitung wie in Abb. 671 bei E mehrfach zu verzweigen oder sie in große Metallplatten endigen zu lassen und sie in Brunnen zu versenken oder bis zum Grundwasser zu führen.

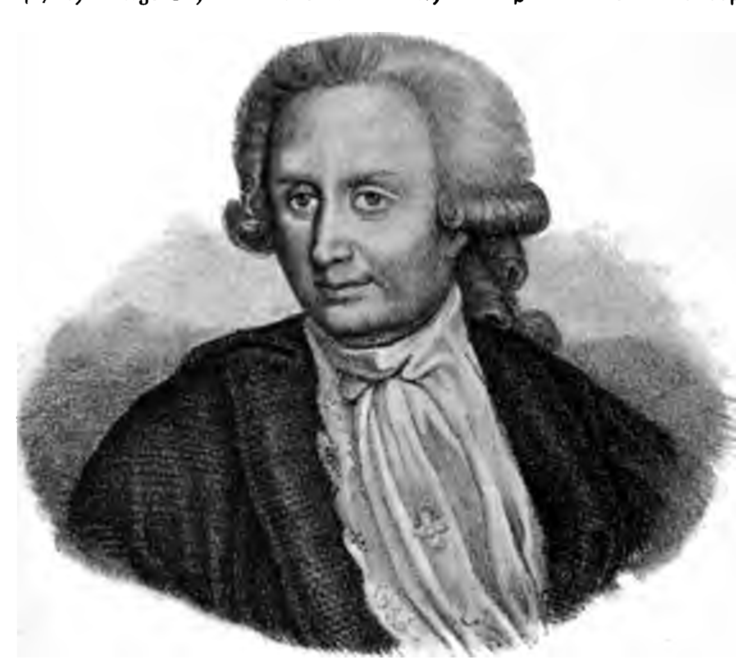
Welchen Segen die Erfindung und Anwendung des Blitzableiters gestiftet hat und in immer erweiterterem Maße stiftet, je mehr unsere Wälder, die natürlichen Wälle, an denen sich die Wut der Gewitter brach, gelichtet werden, ist allbekannt. Unvergänglich ist der Ruhm des großen Amerikaners, welchem die Welt mit vollem Recht das stolze Wort gewidmet hat:

Eripuit coelo fulmen sceptrumque tyrannis.
Dem Himmel entriß er den Blitz, den Tyrannen das Zepter.

Vom Galvanismus.

Galvanis Entdeckung. Froschversuch. Voltas Fundamentalversuch. Kontaktelektrizität. Spannungsreihe. Leiter erster Klasse. Voltas Spannungsgesetz. Leiter zweiter Klasse. Galvanisches Element. Voltasche Säule. Fechnersches Säulenelektroskop. Thomsonsches Quadrantelektrometer. Konstante Elemente. Das Daniellsche, Meidingersche und Callandsche Element. Das Grovesche und Bunsensche Element. Das Leclanchésche Element. Der galvanische Strom. Das Ohmsche Gesetz. Batterieschaltung. Stromverzweigung. Die Wheatstonesche Brücke. Die beiden Kirchhoffschen Sätze. Stromverbindungen.

Jahrtausende lang hat das kaltblütige Geschlecht der Frösche sorglos seinen naturgemäßen Kreislauf vollenden können, in freier Entwickelung sich entfaltet, gelebt und geliebt, einen Feind nur fürchtend, den Meister Adebar, sonst aber in der behaglichen Existenz vielleicht nur gestört durch einen Gourmand, dessen Gelüsten das zahllose Geschlecht einige Schenkel als Tribut entrichten mußte. Mit dem Wendepunkt des vergangenen Jahrhunderts ist aber ein ehernes Zeitalter über den Frosch hereingebrochen; er ist einem Verhängnis verfallen, dem er kaum jemals wieder entrinnen wird. Gehetzt, gefangen, gequält, geschält, geköpft, getötet — endet seine Qual auch nicht mit dem Tode. Der Frosch ist ein physikalischer Apparat geworden und der Wissenschaft verfallen. Auch wenn ihm der Kopf abgeschnitten, die Haut abgezogen, die Muskeln auseinandergeschält, das Rückgrat durchstochen worden ist — er darf noch nicht zur ewigen Ruhe eingehen; auf das Geheiß der Physiker und Physiologen müssen seine Nerven sich noch regen, seine Muskeln noch zusammenzucken, bis das letzte Tröpfchen „Lebensfeuchtigkeit“ vertrocknet ist.



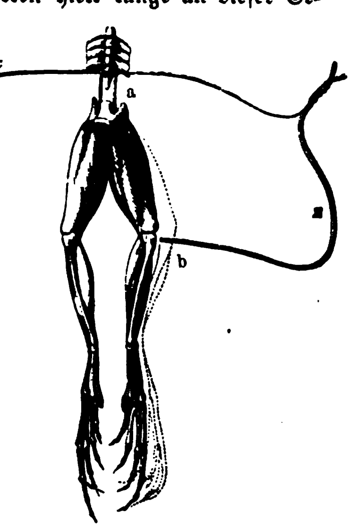
672. Aloisio Luigi Galvani.

Und alles Das hat jener Aloisio Luigi Galvani auf dem Gewissen, welcher am 9. September 1737 zu Bologna geboren und 1775 Professor der Anatomie an der Universität seiner Vaterstadt geworden war, die er auch nur selten verlassen hat. Im Jahre 1797 seiner politischen Gesinnung wegen eine kurze Zeit von seinen Ämtern entfernt, bald aber wieder in dieselben eingesetzt, starb er zu Bologna am 4. Dezember 1798.

Die Geschichte seiner für den Frosch so verhängnisvollen, für die Wissenschaft aber so folgenschweren Entdeckung war folgende: Seiner erkrankten Gattin waren zur Stärkung die Brühen von Froschkeulen verordnet worden. Eines Tages, es soll am 6. November 1780 gewesen sein, lag nun zufällig eine Anzahl zu diesem Zweck abgehäuteter Frösche in dem Zimmer Galvanis, während er gerade mit Versuchen über Elektrizität beschäftigt war, der er eine wesentliche Mitwirkung bei den Muskel- und Nervenfunktionen des Körpers zuschrieb. Bei diesen Versuchen bemerkte er, daß die

getöteten Frösche allemal in eigentümliche Zuckungen gerieten, wenn aus dem Konduktor der Elektrisiermaschine ein Funken gezogen wurde. Um zu erforschen, ob auch die atmosphärische Elektrizität auf die Nerven eine Einwirkung ausübe, hängte Galvani präparierte Froschschenkel mittels eines in der Wirbelsäule befestigten Kupferdrahts an seinem eisernen Balkongeländer auf und suchte sie durch Hin- und Herschwenken mit möglichst viel Luft in Berührnng zu bringen. Indessen verhielten sie sich ganz ruhig; nur zuckten sie, so oft sie mit dem Eisengeländer in Berührung kamen, heftig zusammen.

Diese Thatsache und eine Anzahl unter verschiedenen Abänderungen des Versuchs beobachteter, nicht minder merkwürdiger Erscheinungen, die Galvani mit genauer Schilderung der Umstände veröffentlichte, setzte die gesamte wissenschaftliche Welt in das größte Erstaunen. Galvani, welcher der Anschauung huldigte, daß es eine gewisse Nerven- oder Lebensflüssigkeit gebe, erklärte die Erscheinung in der Art, daß durch die metallische Leitung eine besondere, der Elektrizität ähnliche Flüssigkeit, welche nach ihm die galvanische Flüssigkeit genannt wurde, von den Nerven zu den Muskeln übergeführt werde, und daß der organische Körper sich wie eine geladene Leydener Flasche verhalte, deren Belegungen einerseits die Nerven, andererseits die Muskeln seien, und deshalb durch die Entladung in Zuckungen versetzt werde. Ein großer Teil der Gelehrten hielt lange an dieser Erklärung fest, trotzdem sie sehr bald durch die ausgezeichneten Untersuchungen Alessandro Voltas widerlegt und durch eine neue Theorie ersetzt wurde, welche die Grundlage der Lehre vom Galvanismus geworden ist.



673. Froschversuch.

Volta ist zu Como am 19. Februar 1745 geboren, war bis zu Ende der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts Professor der Physik am Gymnasium seiner Vaterstadt, später an der Universität zu Pavia bis zum Jahre 1804. Napoleon I. ehrte den berühmten Forscher durch Ernennung zum Grafen und Senator von Italien. Die letzten Jahre seines Lebens verbrachte der große Gelehrte zu Como, wo er am 5. März 1827 starb. Nahe seinem Geburtshause ist seinem Andenken eine Marmorstatue errichtet worden.

Voltas Fundamentalversuche. Volta hatte als das Wesentliche in den Versuchen Galvanis erkannt, daß die metallische Leitung aus zwei verschiedenen Metallen, welche mit einander in Berührung gebracht werden, bestehen müsse. Der galvanische Fundamentalversuch läßt sich bequem anstellen, wenn man nach Anleitung von Abb. 673 einen Kupferdraht c mit einen Zinkdraht z verlötet oder auch nur durch Zusammendrehen in innige Berührung bringt und mit dem einen Draht die durch Abtrennung der untersten Rückenwirbel bloßgelegten Schenkelnerven eines frisch präparierten Frosches bei a, mit dem anderen die Schenkelmuskeln bei b berührt. Bei jeder Berührung, sowie bei jeder Unterbrechung der Berührung gerät der Muskel in Zuckungen. Volta zeigte, daß auch ohne Zuhilfenahme des Froschpräparates durch bloße Berührung zweier verschiedener Leiter Elektrizität entwickelt werde.

Diese Elektrizität ist nur in der Art ihrer Entstehung, nicht aber in ihren Eigenschaften und Wirkungen von der durch Reibung erzeugten verschieden. Man nennt sie Berührungs- oder Kontaktelektrizität und die Lehre von derselben Galvani zu Ehren Galvanismus, obwohl erst Volta die grundlegenden Versuche ausgeführt und ihre Erklärung gegeben hat. Voltas Kontakttheorie ist lange Zeit hindurch allgemein als richtig anerkannt worden. In neuerer Zeit jedoch ist man infolge genauerer Untersuchungen der chemischen Wirkungen des galvanischen Stroms geneigt, die Kontakttheorie zu Gunsten der chemischen Theorie fallen zu lassen, der zufolge die Elektrizitätsentwickelung bei der Berührung durch die dabei auftretenden chemischen Vorgänge bedingt sei. Folgendes ist der berühmte Voltasche Fundamentalversuch:

Berührt man zwei mit isolierenden Handgriffen versehene, unelektrische, heterogene Metallplatten, welche dieselbe Temperatur haben mögen, z. B. eine Zink- und eine Kupferplatte, so wird infolge ihrer Berührung die in ihnen enthaltene neutrale Elektrizität zersetzt, die positive Elektriziät strömt nach der einen, die negative nach der anderen Metallplatte ab, und zwar ist nach ihrer Trennung die Zinkplatte positiv, die Kupferplatte negativ elektrisch.

Als Ursache, welche die Trennung der im neutralen Zustande vereinigten, entgegengesetzten Elektrizitäten bewirkt und deren Wiedervereinigung während der Berührung verhindert, nimmt man eine Kraft an, welche elektromotorische Kraft genannt wird, und welche nur abhängig ist von der Natur der beiden einander berührenden Metalle. Infolge der Wirkung dieser Kraft nimmt das Potential der auf dem Zink befindlichen Elektrizitätsmenge einen konstanten positiven und ebenso das Potential der auf dem Kupfer befindlichen Elektrizitätsmenge einen konstanten negativen Wert an. Der absolute Wert dieser Potentiale ist für die beiden Metalle ein verschiedener, die elektrische Differenz oder Potentialdifferenz aber eine Konstante, welche nur abhängig ist von der Natur der beiden Metalle und unabhängig ist von ihrer Größe und von dem absoluten Potentialwerte eines jeden Metalls.



674. Alessandro Volta.

Teilt man den beiden sich berührenden Metallplatten, oder der einen von ihnen mittels irgend einer Elektrizitätsquelle Elektrizität mit, oder leitet man eine der beiden Metallplatten zur Erde ab, so behält ihre Potentialdifferenz stets denselben konstanten Wert.

Dies gilt nun für jede Kombination von zwei Metallen, und es lassen sich, wie bereits Volta experimentell gezeigt hat, sämtliche Metalle in eine Reihe derart anordnen, daß jedes Metall negativ elektrisch wird, wenn es mit einem vorhergehenden, und positiv elektrisch, wenn es mit einem nachfolgenden in Berührung gebracht wird, und daß die Potentialdifferenz zweier Metalle um so größer ist, je weiter sie in dieser Reihe aus einander stehen. Man nennt eine solche Reihe Spannungsreihe und die Substanzen, welche ihr gehorchen, Leiter erster Klasse. Eine solche Reihe von Metallen ist z. B. folgende: Zink, Kadmium, Blei, Eisen, Wismut, Antimon, Kupfer, Silber, Gold, Platin. Zink wird also bei der Berührung mit allen Metallen der Reihe positiv, Platin umgekehrt bei Berührung mit allen negativ elektrisch.

Setzt man die Potentialdifferenz zwischen Zink und Kupfer gleich 100, was durch die symbolische Bezeichnung Zn | Cu = 100 angedeutet wird, so erhält man nach den von Hankel ausgeführten Messungen folgende Werte von Potentialdifferenzen für verschiedene Kombinationen von Metallen:

Cu | Ag = 18	Zn | Cu = 100
Zn | Cd = 24	Zn | Au = 110
Zn | Pb = 44	Zn | Pd = 115
Zn | Sb = 69	Zn | Ag = 118
Zn | Bi = 92	Zn | C = 122
Zn | Fe = 84	Zn | Pt = 123

Voltasches Spannungsgesetz. Galvanisches Element. Aus diesen Zahlenwerten ergibt sich ein wichtiges Gesetz, welches bereits von Volta für die Leiter erster Klasse bewiesen worden ist und das Voltasche Spannungsgesetz genannt wird:

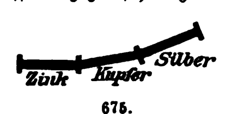
In der metallisch zusammenhängenden Kombination Zink—Kupfer—Silber (Abb. 675) ist die Summe der Potentialdifferenzen

$$\underset{100}{Zn \mid Cu} + \underset{18}{Cu \mid Ag} = 118$$

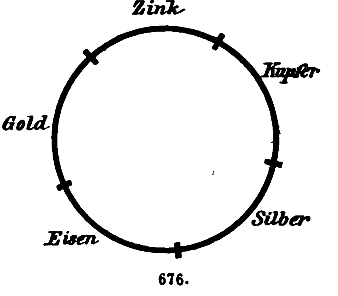
gleich der Potentialdifferenz zwischen Zink und Silber

$$Zn \mid Ag = 118.$$

Allgemein ergibt sich für jede Reihe metallisch verbundener Leiter, daß die Potentialdifferenz zwischen zwei Gliedern der Spannungsreihe genau dieselbe ist, gleichviel ob man sie direkt in Berührung bringt, oder ob man beliebig viele Leiter erster Klasse dazwischen schaltet, vorausgesetzt, daß sämtliche Leiter dieselbe Temperatur besitzen. Die Potentialdifferenz zwischen dem ersten und letzten Metalle ist genau so groß, als wenn sie sich direkt berührten, also als wenn die Zwischenmetalle gar nicht vorhanden wären.



675.

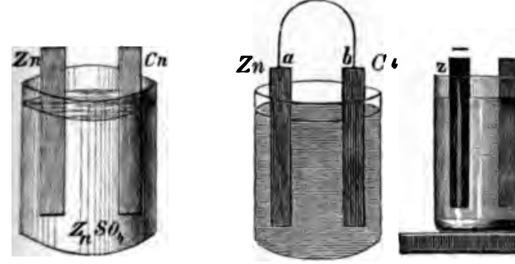


676.

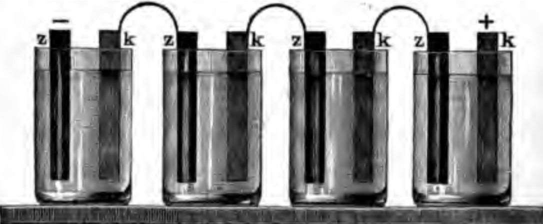
Weiter ergibt sich, daß in jedem aus Leitern erster Ordnung von konstanter Temperatur bestehenden, geschlossenen Kreise die Potentialdifferenz stets Null ist.

In der That ergibt sich die Summe der Potentialdifferenzen in der geschlossenen Reihe Zink—Kupfer—Silber—Eisen—Gold—Zink (Abb. 676):

$$\underset{+100}{\text{Zink} \mid \text{Kupfer}} + \underset{+18}{\text{Kupfer} \mid \text{Silber}} + \underset{-34}{\text{Silber} \mid \text{Eisen}} + \underset{+26}{\text{Eisen} \mid \text{Gold}} + \underset{-110}{\text{Gold} \mid \text{Zink}} = 0.$$



677 u. 678. Galvanisches Element.



679. Voltas Becherapparat.

Es kann also auch in einem solchen Kreise keine elektromotorische Kraft herrschen, welche zu einer Bewegung der Elektrizität Veranlassung geben könnte.

Aber nicht alle Leiter der Elektrizität sind Leiter erster Klasse, sondern es gibt auch Leiter, welche dem Spannungsgesetz nicht gehorchen, z. B. Salzlösungen, verdünnte Säuren, überhaupt die Flüssigkeiten; sie heißen Leiter zweiter Klasse. Befinden sich solche Leiter in einer in sich zurückkehrenden Reihe, so treten andere Erscheinungen auf. Nach der Dissociationstheorie erfolgt die Leitung in den Lösungen, um die es sich ausschließlich hier handelt, vorzugsweise durch den gelösten Körper (Zinkvitriol, Schwefelsäure, Salpetersäure u. s. w.), und zwar in der Weise, daß ein von der Konzentration abhängiger Teil derselben in die sogenannten Jonen (vgl. später S. 554 ff.) zerlegt wird, und diese Jonen mit Elektrizität beladen nach den verschiedenen Polen wandern.

Wird ein Metall in eine Flüssigkeit getaucht, so entsteht, wie sich ebenfalls mittels eines geeigneten Elektroskops nachweisen läßt, eine Potentialdifferenz zwischen der Flüssig-

keit und dem Metall. Zink z. B. in angesäuertes Wasser getaucht wird negativ elektrisch, während das angesäuerte Wasser positiv elektrisch wird. Wasser müßte also in der Spannungsreihe vor dem Zink stehen, und es müßte, mit dem viel tiefer in der Spannungsreihe stehenden Kupfer in Kontakt gebracht, sich gegen das Kupfer stärker positiv zeigen, als gegen das Zink, während das Experiment das Gegenteil ergibt, nämlich daß Kupfer in Wasser getaucht zwar auch negativ elektrisch wird, aber weniger als das Zink. Jedes Metall wird in Berührung mit Wasser negativ elektrisch, und zwar die verschiedenen Metalle in verschiedenem Grade, während das Wasser positiv elektrisch wird. Wasser läßt sich also nicht in die Spannungsreihe einreihen.

Auch der Wert der Potentialdifferenz zwischen Zink und Kupfer ist ein wesentlich anderer in der Kombination Kupfer—Flüssigkeit—Zink (Abb. 677), als in der Kombination Kupfer—Metall—Zink.

Z. B. ergibt sich, ausgedrückt in einer bestimmten, später näher zu erläuternden Einheit, in Volt, für die Potentialdifferenz Kupfer | Zinkvitriol der Wert $-0{,}113$ und für die Potentialdifferenz Zinkvitriol | Zink der Wert $+0{,}358$, als gesamte Potentialdifferenz also:

$$Cu \mid ZnSO_4 + ZnSO_4 \mid Zn = +0{,}245;$$

Kupfer zeigt sich also jetzt gegen Zink positiv elektrisch, während aus der direkten Berührung zwischen Kupfer und Zink oder bei Zwischenschaltung eines Metalls, in derselben Einheit gemessen, die Potentialdifferenz $Cu \mid Zn = -0{,}75$ ist.

Bildet man ferner eine in sich zurückkehrende Reihe, indem man das Zink mittels eines Drahts a b mit dem Kupfer verbindet, so daß beide Endglieder Kupfer sind (Abb. 678), so ergibt sich als gesamte Potentialdifferenz:

$$Cu \mid ZnSO_4 + ZnSO_4 \mid Zn + Zn \mid Cu = $$
$$= -0{,}113 + 0{,}358 + 0{,}75 = +0{,}995,$$

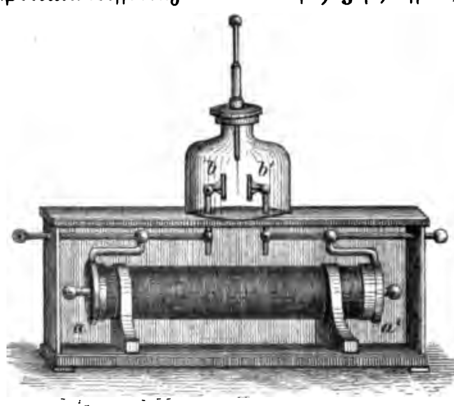
680. Voltasche Säule.

also nahezu gleich ein Volt, während ohne die Zwischenschaltung der Flüssigkeit die Potentialdifferenz in der in sich geschlossenen Reihe Null ist.

Eine Kombination wie die in Abb. 678 dargestellte nennt man ein **vollständiges galvanisches Element**.

Die beiden Metallplatten nennt man die **Pole** des Elements, und zwar die Kupferplatte den positiven, die Zinkplatte den negativen Pol.

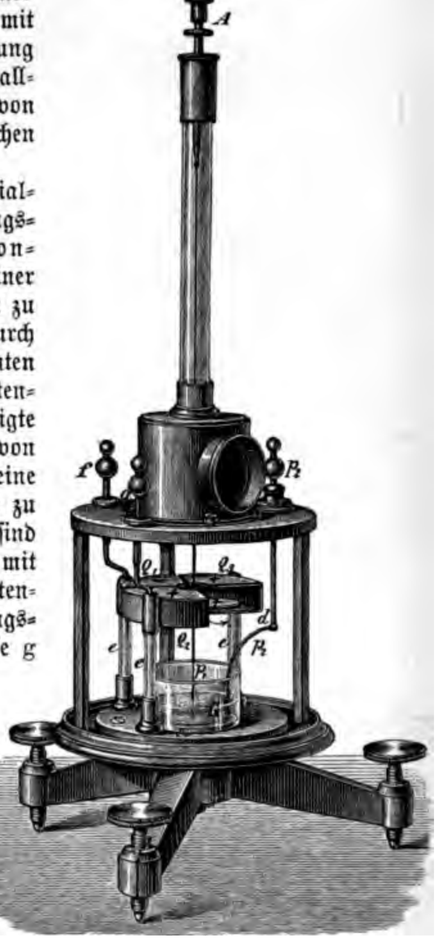
Bildet man eine zusammenhängende Reihe solcher galvanischen Elemente (Abb. 679), indem man immer das positive Metall des einen Elements mit dem negativen des nächsten verbindet (Hintereinanderschaltung), so ist die Differenz der Potentiale zwischen der ersten Kupfer- und der letzten Zinkplatte gleich der Summe der von den einzelnen galvanischen Elementen erzeugten Potentialdifferenzen.



681. Fechnersches Säulenelektroskop.

Die erste von **Volta** im Jahre 1800 konstruierte, nach ihm benannte Säule (Abb. 680) besteht aus abwechselnd über einander geschichteten Platten von Kupfer und Zink, die von einander durch zwischengeschaltete, mit Salz- oder angesäuertem Wasser getränkte Tuchscheiben getrennt sind.

Die Zambonische Säule ist in ihrer Einrichtung der Voltaschen nachgebildet; sie besteht aus Gold- und Silberpapierblättchen, welche abwechselnd mit den Metallseiten an einander gelegt zu einer Säule von mehreren Tausend Blättchen aufgeschichtet sind. Das Papier, welches immer etwas Wasser aus der Luft anzieht, vertritt hier die Stelle des feuchten Leiters. Die Zambonische Säule wird unter anderem bei dem Fechnerschen Säulenelektroskop (Abb. 681) verwendet, einem Instrumente, welches nicht nur empfindlich genug ist für den Voltaschen Fundamentalversuch, sondern in Verbindung mit einem mit Okularmikrometer versehenen Ablesemikroskop auch Potentialdifferenzen quantitativ zu bestimmen ermöglicht. Die Säule befindet sich in einer Glasröhre, deren metallene Verschlußkappen a a' mit den Endpolen der Säule in leitender Verbindung stehen. Von den Verschlußplatten führen zwei Metalldrähte zu den Polplatten b b', zwischen denen ein von einem isolierten Metalldrahte getragenes Goldblättchen herabhängt.

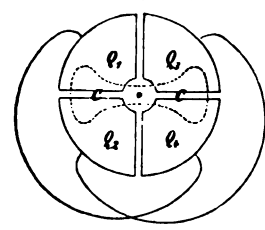


682. Thomsonsches Quadrantelektrometer.

Für genauere Messungen von kleinen Potentialdifferenzen bedient man sich in neuerer Zeit vorzugsweise des durch Abb. 682 dargestellten Thomsonschen Quadrantelektrometers: Innerhalb einer cylindrischen metallenen Büchse, welche durch zwei zu einander senkrechte, diametrale Schnitte in vier, durch isolierte Glasfüße e von einander getrennte Quadranten Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 geteilt ist, schwingt eine lemniskatenförmige, an einer Aufhängungsvorrichtung befestigte Nadel C aus Aluminium, welche in Abb. 683 von oben gesehen dargestellt ist. In Abb. 682 ist der eine Quadrant Q_4, um einen Teil der Nadel sichtbar zu machen, fortgelassen. Von den vier Quadranten sind je zwei (Q_1, Q_4 und Q_2, Q_3) kreuzweise metallisch mit einander verbunden. Jedes der beiden Quadrantenpaare steht durch je einen gut isolierten Verbindungsdraht mit den Klemmschrauben f, beziehungsweise g in Verbindung, welche mit den Leitern, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll, verbunden werden. Ein an der Nadel befestigter Platindraht p_1 taucht in ein mit konzentrierter Schwefelsäure gefülltes Glasgefäß G. Durch einen zweiten, in die Schwefelsäure tauchenden, Platindraht p_2, welcher mit dem einen Pole einer Zambonischen Säule verbunden ist, deren anderer Pol zur Erde abgeleitet wird, erteilt man der Elektrometernadel C ein hohes (z. B. positives) Potential. Verbindet man nun die Leiter, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll, durch die Verbindungsklemmen f und g mit den beiden Quadrantenpaaren Q_1, Q_4 und Q_2, Q_3, so wird die Nadel infolge der auf sie wirkenden elektrischen Kräfte nach dem Coulombschen Gesetze abgelenkt, und die Größe der mit Spiegelablesung zu beobachtenden Nadelablenkung ist der Potentialdifferenz der Quadranten nahezu proportional.

Die Voltasche Säule und die verschiedenen Formen der nach ihr gebauten älteren Elemente von Wollaston, Smee u. a., bei denen eine Flüssigkeit zwischen Metallplatten zur Verwendung kommt, zeigen den Übelstand, daß ihre Wirksamkeit bald nach dem Einschalten derselben in den Stromkreis nachläßt und nach einiger Zeit gänzlich aufhört. Der Grund dieser Abnahme der elektromotorischen Kraft liegt in einer durch die chemischen Vorgänge in der Säule hervorgerufenen elektromotorischen Kraft, welche

der ursprünglichen entgegenwirkt, dieselbe schwächt und schließlich bis auf ein Minimum vernichtet (elektromotorische Gegenkraft, Polarisation). Wird ein solches aus Zink, Kupfer und verdünnter Schwefelsäure bestehendes Element, nachdem seine Wirksamkeit aufgehört hat, aus einander genommen und untersucht, so zeigt sich, daß die Schwefelsäure größtenteils zu Zinkvitriollösung verwandelt und das Kupfer mit Wasserstoffbläschen bedeckt ist. Die eigentlichen Elektroden des Elements sind deshalb nicht mehr Zink und Kupfer, sondern Zink und Wasserstoff. Durch die Polarisation entsteht eine elektromotorische Kraft zwischen Kupfer und Wasserstoff, die der elektromotorischen Kraft Zink-Kupfer entgegengesetzt ist; hierdurch erklärt sich die Abnahme der ursprünglichen elektromotorischen Kraft des Elements.



683. Nadel zum Quadrantelektrometer.

Soll das Auftreten dieser elektromotorischen Gegenkraft verhindert werden, so muß die Entwickelung von freiem Wasserstoff am negativen Metall durch oxydierende Substanzen beseitigt oder wenigstens möglichst vermindert werden. Dies erreicht man bei den sogenannten konstanten Elementen z. B. dadurch, daß man jede der beiden Elektroden in eine besondere Flüssigkeit taucht und sie durch eine poröse Scheidewand (tierische Membran, Thonzelle) von einander trennt. Eine dauernde Trennung der Flüssigkeiten ist indessen wegen der Diffusion derselben nicht möglich. Deshalb müssen die Elemente für Präzisionsmessungen jedesmal neu zusammengesetzt werden.

Als elektropositives Metall wird fast ausschließlich Zink verwendet, welches gut amalgamiert werden muß, damit es, wenn das Element offen ist, von der verdünnten Schwefelsäure nicht angegriffen wird.

Das erste konstante Element wurde von Daniell konstruiert. Abb. 684 stellt ein Daniellsches Element neuerer Form dar. In einem mit gesättigter Kupfervitriollösung gefüllten, cylindrischen Glasgefäße befindet sich ein beiderseits offener Cylinder aus Kupferblech K, und innerhalb desselben in diesem eine poröse Thonzelle T, welche mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist und den Zinkcylinder Z enthält. An Stelle verdünnter Schwefelsäure wird häufig Zinkvitriollösung angewandt. An dem Zinkcylinder sowohl wie an dem Kupfercylinder sind Kupferblechstreifen angenietet, an welche die Klemmschrauben zur Verbindung mit anderen Elementen oder mit der Leitung befestigt werden.



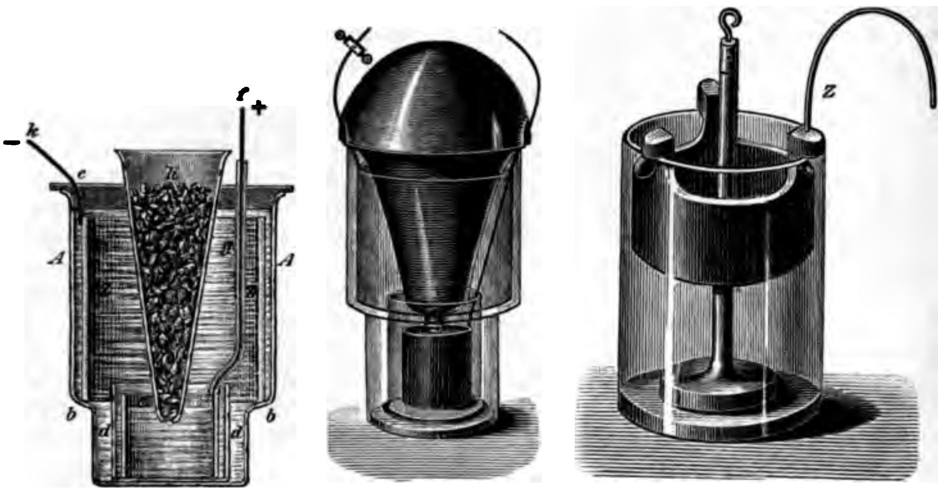
684. Daniell-Element.

Von den vielfachen Modifikationen des Daniellschen Elements ist diejenige von Meidinger, die die Anwendung einer Thonzelle entbehrlich macht, eine der gebräuchlichsten (Abb. 685). Der Zinkring Z steht auf einem Vorsprung des sich unten verengenden Gefäßes A oder wird durch Nasen auf dem Rande desselben gehalten. Ein Kupferring oder eine Kupferplatte befindet sich in einem auf dem Boden von A stehenden Glasgefäße d. A ist mit einer Bittersalzlösung gefüllt, in d befindet sich Kupfersulfatlösung, welche durch einen in d hineintauchenden Trichter, der mit Kupfersulfatkrystallen gefüllt ist, konzentriert erhalten wird. Dieser Trichter wird bei neueren Elementen durch einen umgestülpten Glasballon ersetzt (Ballonelement, Abb. 686). Der Zuleitungsdraht g der Kupferelektrode wird wohlisoliert durch die Bittersalzlösung hindurchgeführt.

Abb. 687 stellt eine Vereinfachung des Meidingerschen Elements dar, welche von Callaud angegeben ist und in der deutschen Reichstelegraphie vielfach angewandt wird: es fehlt der Behälter für die Kupfersulfatkrystalle und das Gefäß für die Kupferplatte. Letztere wird wohl auch ersetzt durch einen Bleistab mit Bleiplatte, welche sich infolge des Stroms mit Kupfer überziehen.

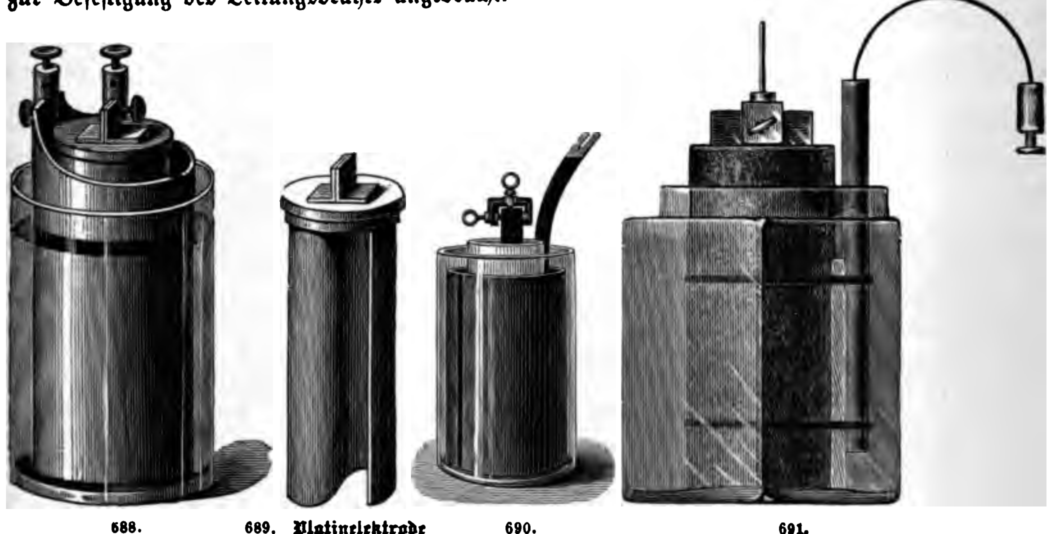
Zu den konstanten Elementen gehört ferner das Grovesche Element, dessen elektromotorische Kraft beinahe doppelt so groß ist wie diejenige des Daniellschen Elements. Es besteht aus Zink in verdünnter Schwefelsäure einerseits und Platin in konzentrierter

Salpetersäure andererseits. In Abb. 688 ist ein Grovesches Element dargestellt. Der gut amalgamierte Zinkcylinder steht in einem cylindrischen, mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Glasgefäße. Innerhalb des Zinkcylinders steht die mit konzentrierter Salpetersäure gefüllte Thonzelle, welche durch einen Porzellandeckel geschlossen ist. An diesem



685. Meidinger-Element. 686. Ballonelement. 687. Callaudsches Element.

Deckel ist das in Abb. 289 besonders dargestellte, S-förmig gebogene Platinblech befestigt. An dem Zinkcylinder und dem aus dem Deckel hervorragenden Platinblech sind Klemmen zur Befestigung des Leitungsdrahts angebracht.



688. Grove-Element. 689. Platinelektrode des Grove-Elements. 690. Bunsen-Element. 691. Leclanché-Element.

Die Bunsensche Kette, eine der wichtigsten und gebräuchlichsten konstanten Ketten von hoher elektromotorischer Kraft, hat dieselbe Zusammensetzung wie die Grovesche, nur ist das kostspielige Metall Platin durch Retortenkohle ersetzt.

Bei den neueren Elementen steht die parallelepipedische Kohle in der Thonzelle, der Zinkcylinder im äußeren Glasgefäße (Abb. 690), bei den älteren Elementen war die Anordnung die umgekehrte.

Die Bunsensche wie die Grovesche Kette besitzen durch ihre bedeutend höhere elektromotorische Kraft einen großen Vorzug vor der Daniellschen. Die Anwendung von

konzentrierter Salpetersäure hat jedoch verschiedene Übelstände zur Folge, welche die Anwendbarkeit dieser Elemente in geschlossenen Räumen, namentlich in solchen, in denen sich Metallgegenstände befinden, ausschließt. Die sich entwickelnden Dämpfe von Stickstoffdioxyd sind nämlich für die Atmungsorgane äußerst schädlich und greifen alle Metallgegenstände, besonders Eisen, aufs heftigste an. Die Elemente müssen deshalb in freier Luft oder in einem abgesonderten, mit Abzug versehenen Raume aufgestellt werden. Eine weitere Folge ist die Oxydierung der Elementenklemmen.

Die wichtigste Abänderung der Bunsenschen Kette, welche den Gebrauch der Salpetersäure entbehrlich macht, rührt von Bunsen selbst her. Er ersetzte die Salpetersäure durch Chromsäure oder durch eine Lösung von doppeltchromsaurem Kali in Schwefelsäure. Ein häufig angewandtes, gleichfalls von Bunsen angegebenes, aber inkonstantes Element besteht aus Zink, Kohle und der Chromsäureflüssigkeit allein. Um während der Nichtanwendung des Elements die lokale Wirkung aufzuheben, werden die Elemente so eingerichtet, daß sich das Zink aus der Flüssigkeit herausheben läßt.

Von den übrigen Elementen, welche nicht zu den sogenannten konstanten zu rechnen sind, verdient noch besondere Erwähnung das Leclanchésche Element, welches in der Haustelegraphie und Telephonie ausgedehnte Anwendung findet. Es besteht aus Zink und Kohle mit Braunstein in Salmiaklösung, in welcher Kohle und Braunstein zu einer Elektrode zusammengepreßt, und das Zink durch eine zwischengelegte Porzellanschiene oder einen Filzstreifen von dem Kohlencylinder isoliert ist. Abb. 691 stellt ein Leclanchésches Element neuerer Konstruktion dar.

Da diese Elemente nur für kurz dauernde Ströme benutzt werden, so behalten sie ihre Wirksamkeit längere Zeit hindurch.

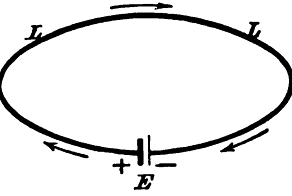
Die sogenannten Trockenelemente sind meistens Leclanchésche Elemente, in denen die Elektroden statt in Salmiaklösung in einer Masse stehen, welche mit dieser Lösung getränkt ist. Die Dauer der Elemente ist davon abhängig, auf welche Zeit diese Masse feucht erhalten werden kann.

Die Erklärung der Wirkungsweise der Elemente wird bei der Besprechung der chemischen Wirkungen des Stroms gegeben werden; dort werden auch die sekundären Elemente oder Akkumulatoren ihre Behandlung finden.

Der galvanische Strom. Das Ohmsche Gesetz. Jedes galvanische Element ist im stande, kontinuierlich ein Strömen von Elektrizität zu erzeugen. Gleichwie in zwei durch eine kommunizierende Röhre mit einander verbundenen Wasserreservoiren von verschiedenem Niveau das Wasser aus dem Reservoir mit höherem Niveau kontinuierlich zu demjenigen mit niedrigerem Niveau überströmt, wenn auf irgend eine Weise, etwa durch ein Pumpwerk, dafür gesorgt wird, daß die beiden Wasserreservoire ihre ursprünglichen Niveaus beibehalten, so wird auch in einem galvanischen Element, zwischen dessen Elektroden ja eine von der Natur der Substanzen abhängige konstante Potentialdifferenz herrscht, ein kontinuierliches Strömen von Elektrizität stattfinden, wenn das Element geschlossen, d. h. eine leitende Verbindung zwischen seinen Elektroden hergestellt wird. Als Richtung des Stroms nimmt man diejenige von dem Orte höheren Potentials zu dem Orte niedrigeren Potentials an, das ist die Richtung, in welcher positive Elektrizität strömt; es wird also z. B. in dem (äußeren) Schließungsdrahte des Elements (Abb. 678) die positive Elektrizität von Kupfer zum Zink und (im inneren) vom Zink durch die Flüssigkeit zum Kupfer fließen und die negative Elektrizität in entgegengesetztem Sinne. Beide Elektrizitäten würden sich ausgleichen, wenn nicht sofort infolge der elektromotorischen Kraft wieder eine Scheidung der Elektrizitäten und also eine Potentialdifferenz hervorgerufen würde, welche wieder einen Strom veranlaßt u. s. w. Auf diese Weise kommt ein stationärer galvanischer Strom zustande, d. i. ein Strom, in welchem an demselben Punkte stets dasselbe vor sich geht.

Georg Simon Ohm hat im Jahre 1827, indem er von derselben Hypothese ausging, welche Fourier für die Fortpflanzung der Wärme aufgestellt hat, und welche mit der Erfahrung im Einklange steht, die Gesetze der Fortpflanzung der Elektrizität in von stationären Strömen durchflossenen Leitern hergeleitet.

In jedem einfachen Stromkreise — so nennt man eine aus einem Element E und einem Verbindungsdraht L bestehende, in sich geschlossene Leitung (Abb. 692) — wird durch jeden Querschnitt in derselben Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge fließen müssen. Wir können uns dies leicht durch einen Vergleich mit einem in einer Leitung fließenden Wasserstrome deutlich machen. Stellen wir uns vor, daß in einer bestimmten Zeit, etwa einer Sekunde, stets eine bestimmte Wassermenge in die Leitung einströme, und daß genau dieselbe Wassermenge pro Sekunde aus der Leitung ausströme, so daß also die Leitung andauernd mit Wasser gefüllt ist, so wird offenbar durch jeden Querschnitt der Leitung in der Sekunde stets dieselbe Wassermenge hindurchfließen müssen, wie verschieden auch die Querschnitte an den einzelnen Stellen der Leitung sein mögen. Ebenso wird beim stationären galvanischen Strom durch jeden Querschnitt der Leitung in derselben Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge fließen müssen. Man nennt nun die in der Zeiteinheit, in der Sekunde, durch den Querschnitt der Leitung fließende Elektrizitätsmenge die Stromstärke oder Stromintensität, demgemäß wird also in einem einfachen Stromkreise an allen Stellen stets dieselbe Stromstärke herrschen. Wodurch wird nun in einem Stromkreise die Stromstärke bedingt sein? Offenbar wird durch jeden Querschnitt pro Sekunde, ceteris paribus, um so mehr Elektrizität fließen, je größer die treibende Kraft ist, welche die Elektrizität bewegt oder den galvanischen Strom erzeugt, d. h. die Stromstärke ist um so größer, je größer die elektromotorische Kraft ist. Ferner wird um so weniger Elektrizität pro Sekunde durch den Querschnitt gehen, je größer der Widerstand ist, den die Elektrizität bei ihrem Durchgange zu überwinden hat. Dieser Widerstand setzt sich aber zusammen aus dem Widerstand, den die Bestandteile des Elements, und dem Widerstande, den die Verbindungsdrähte dem Stromdurchgange entgegensetzen. Je größer also der Gesamtwiderstand des Stromkreises ist, um so geringer wird bei konstanter elektromotorischer Kraft die Stromstärke sein.



692. Einfacher Stromkreis.

Diese beiden Sätze lassen sich in den einen zusammenfassen, der das Ohmsche Gesetz bildet:

In jedem einfachen Stromkreise ist die Stromstärke gleich dem Quotienten aus der elektromotorischen Kraft und dem Gesamtwiderstande.

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektromotorische Kraft}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Nun zeigt sich, daß der Widerstand eines Leiters erstens mit zunehmender Länge zunimmt und zweitens mit wachsendem Querschnitt abnimmt, und daß er drittens bei gleichbleibender Länge und gleichbleibendem Querschnitt wesentlich von der Natur der Substanz des Leiters abhängt. Ein Silberdraht hat einen geringeren Widerstand als ein Kupferdraht und dieser wieder einen geringeren Widerstand als ein Platindraht von gleicher Länge und gleichem Querschnitt.

Wählt man also den Widerstand, welchen eine bestimmte Substanz von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt dem Stromdurchgang entgegengesetzt, als Einheit, z. B. nach dem Vorschlage von Werner **Siemens** eine Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt, so kann man für jede Substanz eine Zahl finden, welche angibt, um wieviel deren Widerstand bei derselben Länge und demselben Querschnitt größer oder kleiner ist als der des Quecksilbers. Man nennt diese Zahl den **spezifischen Widerstand** der Substanz bezogen auf Quecksilber. Den reziproken Wert des spezifischen Widerstands nennt man **spezifische Leitungsfähigkeit** oder spezifisches Leitungsvermögen. Aus Gründen, die hier noch nicht erörtert werden können, ist man übereingekommen, nicht die Länge einer Quecksilbersäule von 1 m, sondern von 1,063 m und 1 qmm Querschnitt unter der Bezeichnung ein **Ohm** als **Widerstandseinheit** anzunehmen. Dies ist nämlich gerade der Widerstand, welchen ein einfacher Kreisstrom besitzen muß, wenn die elektromotorische Kraft von 1 Volt in ihm die Stromstärke von 1 Ampère hervorbringen soll, so daß wir also nach dem Ohmschen Gesetze die Beziehung haben:

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}.$$

Wir wollen das Ohmsche Gesetz noch durch eine graphische Darstellung veranschaulichen. Denken wir uns den Schließungsdraht L L von Abb. 692 zur Linie A B gerade gestreckt (Abb. 693) und die zwischen A und B herrschende Potentialdifferenz durch die Ordinate A C dargestellt, dann werden die Potentialdifferenzen zwischen den Punkten A' und B, A'' und B, A''' und B durch die Ordinaten A' C', A'' C'', A''' C''' dargestellt, deren Endpunkte in der Geraden C B liegen. Wäre A B eine Röhrenleitung und stellte A C den bei A herrschenden Druck vor, unter welchem Wasser durch die Leitung strömt, so würden die an den Stellen A', A'', A''' herrschenden Drucke auch durch die Ordinaten A' C', A'' C'', A''' C''', deren Endpunkte in der Geraden C B liegen, dargestellt. Das läßt sich experimentell zeigen sowohl für das strömende Wasser wie für die strömende Elektrizität. Für jedes Stück des Drahtes gilt ein ähnliches Gesetz wie für den ganzen geschlossenen Stromkreis; die Stromstärke in ihm ist gleich der zwischen seinen Enden herrschenden Potentialdifferenz, dividiert durch seinen Widerstand.

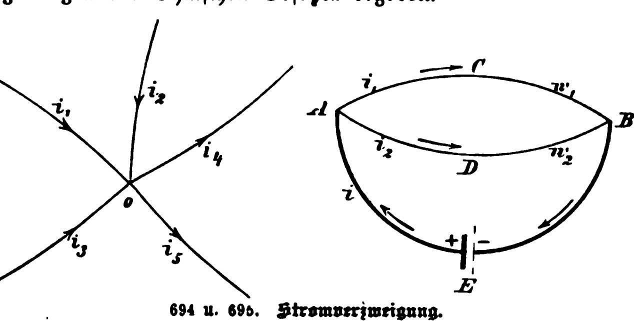
Batterieschaltung. Der Gesamtwiderstand eines Stromkreises setzt sich aus zwei Teilen zusammen, aus dem inneren oder wesentlichen Widerstande, d. i. aus dem Widerstande des Elementes oder der Kette, und aus dem äußeren oder außerwesentlichen Widerstande, d. i. dem Widerstande der Leitung. Es tritt häufig die Frage auf, in welcher Weise eine aus mehreren Elementen bestehende Kette bei gegebenem äußeren Widerstande zu schalten ist, um die günstigste Wirkung zu erzielen. Stehen z. B. 6 Daniellsche Elemente zur Verfügung, und schaltet man dieselben hinter einander, so daß also stets der Zinkpol des einen Elements mit dem Kupferpol des andern verbunden wird, so ist zwar die gesamte elektromotorische Kraft sechsmal größer als die eines Elements, der gesamte innere Widerstand ist aber gleichfalls auf das sechsfache gestiegen, der Quotient aus elektromotorischer Kraft und aus Gesamtwiderstand, also die Stromstärke, ist dieselbe geblieben. Schaltet man dagegen die Elemente parallel oder neben einander, d. h. verbindet man alle Zinkpole mit einander und ebenso alle Kupferpole, so daß man also gewissermaßen ein einziges Element mit großer Zink- und großer Kupferoberfläche erhält, dann bleibt die elektromotorische Kraft, welche ja nur von der Natur der Substanzen, nicht aber von der Größe der Oberfläche abhängig ist, gleich der eines einzelnen Elements, dagegen wird der gesamte innere Widerstand, da der Querschnitt, durch den der Strom fließt, sechsmal größer ist, als der eines einzelnen Elements, sechsmal kleiner, als der Widerstand eines Elements, demgemäß wird also die Stromstärke bei dieser Anordnung sechsmal größer. Ist nun der äußere Widerstand des Schließungskreises klein im Vergleich zu dem gesamten inneren Widerstande, so daß er gegen letzteren vernachlässigt werden kann, dann würde bei der Hintereinanderschaltung an Stromintensität nichts gewonnen werden, bei der Parallelschaltung dagegen die sechsfache Stromstärke erzielt werden. Parallelschaltung wäre also z. B. zu wählen, wenn ein kurzer Draht durch den Strom zum Glühen gebracht werden soll. Ist dagegen der äußere Widerstand des Schließungskreises sehr groß, so daß im Vergleich mit ihm der innere Widerstand vernachlässigt werden kann, wie dies z. B. bei einer langen Telegraphenleitung der Fall ist, dann würde man durch Parallelschaltung der 6 Elemente nichts an Stromstärke gewinnen, dagegen durch Hintereinanderschaltung das Sechsfache der Stromstärke eines Elements erzielen. — Es ergibt sich also die Regel, daß bei großem äußeren Widerstande Hintereinanderschaltung, bei kleinem äußeren Widerstande Parallelschaltung vorteilhaft ist. In manchen Fällen kann es zweckmäßig sein, die Elemente zum Teil neben, zum Teil hinter einander zu schalten, und es läßt sich zeigen, daß man mit einer gegebenen Anzahl von Elementen stets das Maximum der Stromstärke erzielt, wenn man sie derart schaltet, daß der äußere Widerstand gleich dem inneren ist.

693. Ohmsches Gesetz.

Stromverzweigung. Wir haben bisher unserer Betrachtung nur einen einfachen Stromkreis zu Grunde gelegt und für einen solchen das Ohmsche Gesetz abgeleitet. In

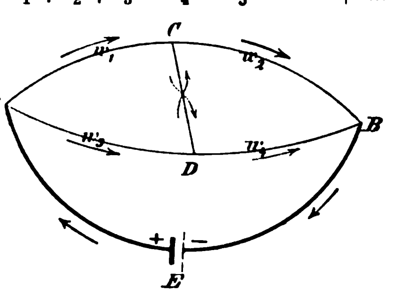
der ganzen Leitung des einfachen Stromkreises war die Stromstärke dieselbe. Dies ist nicht mehr der Fall bei einer verzweigten Leitung; in einer solchen herrschen in verschiedenen Zweigen der Leitung verschiedene Stromstärken. Für beliebig verzweigte Leitungssysteme lassen sich die Beziehungen der Stromintensitäten und der Widerstände in den einzelnen Zweigen der Leitung durch zwei von G. Kirchhoff aufgestellte Sätze herleiten, welche sich als Folgerungen des Ohmschen Gesetzes ergeben.

Der erste Satz lautet: In jedem Verzweigungspunkte einer Leitung ist die algebraische Summe der Stromintensitäten gleich Null, wenn man den von dem Verzweigungspunkte abfließenden Strömen das entgegengesetzte Zeichen gibt wie den zufließenden. Treffen also in dem Punkte O (Abb. 694) verschiedene Ströme zusammen, so muß die Elektrizitätsmenge, welche dem Punkte durch die Ströme i_1, i_2, i_3 zugeführt wird, gleich sein der Elektrizitätsmenge, welche von ihm in derselben Zeit durch die Ströme i_4, i_5 fortgeführt wird, weil sonst in O eine Anhäufung von Elektrizität stattfinden würde; es muß also, wenn wir die zufließenden Ströme positiv, die abfließenden negativ nennen, die algebraische Summe $i_1 + i_2 + i_3 - i_4 - i_5 =$ Null sein.



694 u. 695. Stromverzweigung.

Der zweite Satz lautet: In jedem geschlossenen Teil einer Leitung ist die Summe der Produkte aus den einzelnen Widerständen und den entsprechenden Stromstärken gleich der Summe der darin herrschenden elektromotorischen Kräfte, wenn man die Ströme in einer bestimmten Richtung positiv, in der entgegengesetzten negativ nennt.



696. Wheatstonesche Brücke.

Abb. 695 stellt eine Leitung dar, welche sich bei A und B verzweigt; der vom positiven Pol des Elements E kommende Strom teilt sich bei A und fließt in der Richtung der Pfeile einerseits über C, andererseits über D nach B zum negativen Pol zurück.

In dem Zweige ACB ist die Stromstärke $i_1 = \frac{\text{der zwischen A u. B herrschenden Potentialdifferenz}}{\text{Widerstand } w_1 \text{ des Zweiges}}$.

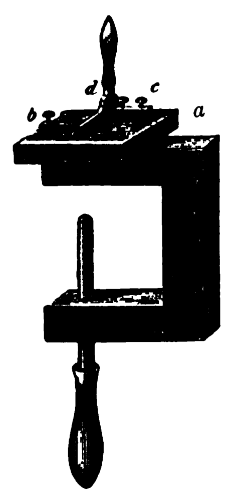
" " " ADB " " " $i_2 = \frac{\text{der zwischen A u. B herrschenden Potentialdifferenz}}{\text{Widerstand } w_2 \text{ des Zweiges}}$.

Die Stromstärken in den beiden Zweigen verhalten sich also umgekehrt wie deren Widerstände. Wäre w_1 doppelt so groß wie w_2, so würde i_1 nur halb so groß sein wie i_2. In dem unverzweigten Teil AEB der Leitung ist die Stromstärke i gleich der Summe der Stromstärken i_1 und i_2 in den beiden Zweigen; denn es muß vom Verzweigungspunkte A ebenso viel Elektrizität abfließen, als zu ihm strömt. Durch Anlegung des Zweiges ADB wird der Querschnitt des Stromdurchgangs vergrößert, demnach wird der Widerstand, den die beiden Zweige zusammen dem Strome bieten, kleiner sein, als jeder der Einzelwiderstände. Man sagt analog wie bei der Anordnung der Elemente, die Widerstände seien parallel oder neben einander geschaltet. Durch Parallelschaltung von Drähten verkleinert, durch Hintereinanderschaltung vergrößert man den Widerstand der Leitung.

Ein komplizierterer, aber praktisch außerordentlich wichtiger Fall der Stromverzweigung wird durch Abb. 696 dargestellt; zwischen die beiden Zweige ist nämlich noch ein dritter Zweig CD, der sogenannte Brückenzweig eingeschaltet. Verfolgen wir die durch die Pfeile angegebene Richtung des positiven Stroms, so sehen wir, daß durch den Brückenzweig zwei Ströme in entgegengesetzter Richtung fließen. Denn der bei A sich

verzweigende Strom fließt einmal durch die Brücke von C nach D, das andere Mal von D nach C, um über B zum negativen Pole des Elements zurückzukehren. Diese in entgegengesetzter Richtung fließenden Ströme werden also offenbar einander schwächen, und es wird der Fall eintreten können, daß sie sich ganz aufheben, daß also durch den Brückenzweig gar kein Strom fließt, während die anderen Zweige von Strömen durchflossen werden. Wann dieser Fall eintritt, wird, wie eine einfache Überlegung zeigt, von dem Verhältnis der vier Zweigwiderstände w_1, w_2, w_3, w_4 abhängen. Durch die Brücke wird kein Strom fließen, wenn zwischen den Punkten C und D keine Potentialdifferenz besteht. Dann muß die Potentialdifferenz zwischen A und C gleich der zwischen A und D, und ebenso die Potentialdifferenz zwischen C und B gleich der zwischen D und B sein. Wenn ferner kein Strom durch den Zweig CD fließt, so können wir uns diesen entfernt denken, und es folgt dann, daß die Stromstärke in AC gleich der in CB und die Stromstärke in AD gleich der in DB ist. Und hieraus folgt, daß, wenn durch die Brücke kein Strom fließen soll, zwischen den vier Zweigwiderständen die Beziehung stattfinden muß:

$$w_1 : w_3 = w_2 : w_4 \text{ oder } w_1 . w_4 = w_2 . w_3.$$



697. Du Bois-Reymonds Stromschlüssel.

Diese Anordnung bietet die Möglichkeit, Widerstände mit einander zu vergleichen und zu messen; auf ihr beruht die Wheatstone-Kirchhoffsche Brückenkombination, oder wie sie kürzer genannt wird, die Wheatstonesche Brücke, auf deren Besprechung wir noch zurückkommen werden.

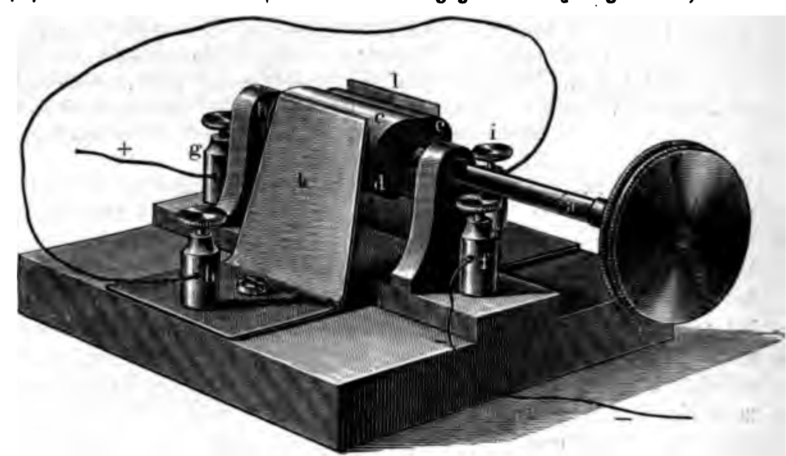
Stromverbindung. Stromschlüssel. Stromwender. Zur Verbindung der Elemente mit den Zuleitungsdrähten und dieser mit den Apparaten, durch welche der galvanische Strom gesandt werden soll, ferner um den Strom zu schließen oder seine Richtung zu ändern, dienen die verschiedensten Formen von Verbindungsklemmen, Stromschlüsseln und Stromwendern.

Abb. 697 stellt den du Bois-Reymondschen Stromschlüssel dar, welcher zum bequemen Schließen und Öffnen eines Stromkreises dient. Auf eine Hartgummiplatte a, die durch eine Schraubzwinge an eine Tischplatte befestigt werden kann, sind die als Klemmschrauben ausgebildeten Metallklötze b und c angebracht. Die Verlängerung von c bildet die Drehungsachse des mit isolierendem Handgriff versehenen Hebels d, welcher in der gezeichneten Lage die Klötze b und c, an welche die Enden der Leitung geführt sind, verbindet und demgemäß den Stromkreis schließt. Wird der Hebel mittels der Handhabe nach oben gedreht, so wird die Leitung zwischen b und c aufgehoben, der Stromkreis demnach unterbrochen.

Abb. 698 stellt den Ruhmkorffschen Stromwender oder Kommutator dar, welcher sowohl dazu dient, einen Stromkreis zu schließen und zu öffnen, als auch in einem Schließungskreise die Stromrichtung umzukehren. Der Hartgummicylinder c trägt die sorgfältigst von einander isolierten Messingwülste d und e. Die Achse des Cylinders besteht aus zwei von einander isolierten Metallteilen a und b, welche durch ihre metallischen Lager mit den Klemmschrauben f, resp. g in Verbindung stehen, zu denen die Poldrähte der Stromquelle führen. Der eine der Messingwülste d steht mit dem vorderen Teile a der Achse, also auch mit Klemmschraube f, der andere e mit dem hinteren Teile b der Achse, also auch mit g in metallischer Verbindung. In der durch die Zeichnung veranschaulichten Stellung des Kommutators pressen die beiden starken Metallfedern k und l, welche mit den beiden Klemmschrauben h, resp. i und durch diese mit den Enden der Leitung in Verbindung stehen, gegen die Messingwülste d und e; der Strom ist dadurch geschlossen, und zwar geht die positive Richtung des Stroms von g durch b nach e, durch die Metallfeder l zur Klemmschraube i, durch die Leitung nach der Klemmschraube h und von derselben durch die Messingfeder k, den Kupferwulst d zum vorderen Teile a der Achse, zu der Klemmschraube f und endlich von dort zum negativen Pol der Kette. Wird die Achse um 180° gedreht, so daß der Metallwulst d gegen die Metallfeder l

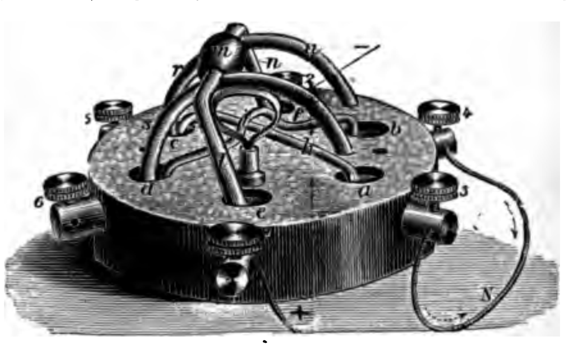
drückt, so wird die Stromrichtung umgekehrt, der positive Strom geht alsdann von g über b zu e und durch k nach h und von dort in entgegengesetzter Richtung wie vorher durch die Leitung nach i und über die Metallfeder l, Wulst d, Achse a und Klemmschraube f zum negativen Pol der Kette.

Dreht man den Cylinder c um 90°, so daß die Wülste d und e sich vertikal über einander befinden, so drücken die Metallfedern k und l gegen den Hartgummicylinder selbst, der Strom ist also dann unterbrochen.



698. Ruhmkorffs Kommutator.

Ein zweckmäßiger und bequemer Stromschlüssel und Stromwender ist der Gyrotrop von Pohl, bekannter unter dem Namen der Pohlschen Wippe (Abb. 699). In einer starken Hartgummiplatte sind sechs napfförmige Vertiefungen a, b, c, d, e, f ausgearbeitet, welche mit Quecksilber angefüllt werden. In die Quecksilbernäpfe e und f tauchen die mittleren Arme l und n zweier dreiarmiger Bügel, welche an dem isolierenden Hartgummicylinder m befestigt sind. Sie bilden eine Wippe, welche entweder mit den Armen t und u in die Quecksilbernäpfe a, resp. b, oder mit den Armen s und r in die Quecksilbernäpfe d, resp. c getaucht oder endlich in vertikaler Stellung außer Kontakt mit den Quecksilbernäpfen gebracht werden kann. Mit den 6 Quecksilbernäpfen stehen die 6 Klemmschrauben 1, 2, 3, 4, 5, 6 in metallischer Verbindung. Die Poldrähte der Stromquelle werden mittels der Klemmschrauben 1 und 2 mit den die Achse der Wippe bildenden Quecksilbernäpfen e und f verbunden, die Enden der Leitung, in welcher die Stromrichtung gewechselt werden soll, entweder mit den Klemmschrauben 3 und 4 oder mit den Klemmschrauben 5 und 6. Die Quecksilbernäpfe a und c, sowie b und d sind kreuzweise durch starke Kupferdrähte h und i, welche einander nicht berühren, verbunden. In der gezeichneten (nach links gekehrten) Lage der Wippe geht die Richtung des positiven Stroms von e über l und s nach d, von dort durch den Kupferdraht i nach b, durch die Leitung nach a, von dort durch den Kupferdraht h nach c und über den seitlichen Arm r, den Mittelarm n durch f zum negativen Pol der Kette.



699. Pohlsche Wippe.

Wird die Wippe nach rechts umgelegt, so geht die positive Richtung des Stroms von e über l nach a, von dort durch die Leitung in entgegengesetzter Richtung wie vorhin, nach b, durch die Arme u und n des Bügels nach f und von dort zum negativen Pol der Kette. Die in der Abbildung sichtbare Feder dient dazu, den Bügel in der Mittellage, in welcher die seitlichen Arme die Quecksilbernäpfe nicht berühren, in welcher daher der Stromkreis geöffnet ist, festzuhalten.

Die Wirkungen des galvanischen Stroms.

Magnetische Wirkungen.

Oerstedts Entdeckung. Ablenkung der Magnetnadel. Ampèresche Regel. Schweiggers Multiplikator. Die Tangentenbussole. Galvanometer. Astatisches Nadelpaar. Galvanometer von Nobili, von Wiedemann, von Werner Siemens, von William Thomson. Das Torsionsgalvanometer. d'Arsonvals Galvanometer. Neueste Siemenssche Form desselben. Elektromagnetismus. Entdeckung von Arago. Ampères Solenoid und Theorie des Magnetismus. Starke Elektromagnete. Paramagnetismus und Diamagnetismus. Faradays Entdeckung der „Magnetisierbarkeit des Lichtstrahls“. Ruhmkorffs Elektromagnet. Einwirkung eines Solenoids auf weiches Eisen. Selbstunterbrecher. Morses Schreibapparat. Ritchies elektromagnetische Maschine.

Die Eigenschaften und Wirkungen des galvanischen Stroms äußern sich in der mannigfachsten Weise und finden nicht nur in der vom Strome durchlaufenen Bahn, sondern auch außerhalb derselben statt. Obwohl es rationeller wäre, zuerst die innerhalb der Strombahn ausgeübten Wirkungen zu erörtern, wollen wir doch zuvor eine Wirkung des galvanischen Stroms betrachten, die außerhalb seiner Bahn vor sich geht, nämlich die magnetische, weil auf ihr die Einrichtungen der wichtigsten Meßinstrumente und die wichtigsten Meßmethoden beruhen. Schon früh war man bestrebt, gewisse Beziehungen zwischen den magnetischen und elektrischen Erscheinungen aufzustellen, besonders seitdem man die Entdeckung gemacht hatte, daß der Blitz ebenso wie der Funke der Leydener Flasche die Pole von Magnetnadeln umkehren oder ihren Magnetismus ganz und gar vernichten oder auch nicht magnetische Stahlnadeln zu Magneten machen könne.

Im Winter von 1819 zu 1820 machte **Oerstedt** in Kopenhagen in einer seiner Vorlesungen über Physik die merkwürdige Beobachtung, daß ein mit den Polen einer Voltaschen Säule verbundener Platindraht eine Magnetnadel, über welche er zufällig fortgeleitet wurde, in eigentümliche Schwankungen versetzte. Lange vorher sollen analoge Erscheinungen von dem Physiker **Romagnosi** bemerkt und von **Aldini** veröffentlicht worden sein, was indessen von anderer Seite bestritten wird. Oerstedt selbst schien anfänglich die Wichtigkeit seiner Entdeckung nicht erkannt zu haben; denn er beeilte sich durchaus nicht, seine Beobachtung den Naturforschern in einer Schrift bekannt zu geben, und es dauerte noch geraume Zeit, ehe die Oerstedtsche Entdeckung die allgemeine Aufmerksamkeit erregte, dann aber rief sie überall einen ungeheuren Enthusiasmus hervor. In den wissenschaftlichen Zeitschriften jener Zeit begegnete man fast nur Berichten und Diskussionen von Versuchen, welche sich auf die Oerstedtsche Entdeckung bezogen; alle anderen Gebiete der Physik wurden von ihren Bearbeitern verlassen, und nicht nur die Naturforscher, Physiker und Ärzte, sondern auch Dilettanten bemächtigten sich, wie **Pfaff** erzählt, mit einer unerhörten Leidenschaftlichkeit der neuen Thatsachen. Oerstedt lebte in aller Munde, und doch konnte noch niemand die Tragweite seiner Beobachtungen ahnen. Wenn wir heute freilich die aus jenem Keim entsprossenen Erfolge, deren großartigster die elektromagnetische Telegraphie ist, betrachten, so scheint es uns kaum glaublich, daß der Ursprung der ganzen Wissenschaft noch nicht ein Jahrhundert hinter uns zurückliegen soll.

Man kann den Oerstedtschen Fundamentalversuch leicht anstellen, indem man den Schließungsdraht eines galvanischen Elements über eine freischwebende Magnetnadel in der Nord-Süd Richtung führt (Abb. 701). Solange kein Strom durch den Draht geht, bleibt die Magnetnadel im magnetischen Meridian; sobald aber die Kette geschlossen wird, wird sie je nach der Stärke des Stroms mehr oder weniger abgelenkt und zeigt das Bestreben, sich senkrecht zur Richtung des Drahts zu stellen. Dabei ist es nicht gleichgültig, ob der Draht oberhalb oder unterhalb der Magnetnadel geführt wird; in beiden Fällen findet eine Ablenkung statt, aber nach verschiedener Richtung. Die Richtung, nach welcher die Magnetnadel von dem galvanischen Strom abgelenkt wird, hängt von der Richtung des letzteren ab und wird durch folgende, von dem berühmten französischen Physiker **Ampère** aufgestellte Regel erhalten: Man denke sich in der Richtung des positiven Stroms mit dem Kopfe voran schwimmend (so daß also der positive Strom zu den Füßen

ein- und am Kopfe austritt) und dabei die Magnetnadel anblickend, so wird ihr Nordpol nach links abgelenkt. Je stärker der Strom ist, um so größer ist die Ablenkung, so daß umgekehrt die Größe der Ablenkung ein Maß für die Stromstärke bietet. Es folgt hieraus, daß, wenn man den Draht oberhalb der Nadel hin- und unterhalb derselben wieder zurückführt (Abb. 701), die Ablenkung in beiden Fällen in demselben Sinne erfolgt und daher verdoppelt wird. Weiterhin folgt, daß, wenn man eine Magnetnadel freischwebend innerhalb der Windungen eines mehrfach kreisförmig gewundenen Drahts aufhängt und durch diesen einen galvanischen Strom leitet, die Magnetnadel um so stärker abgelenkt werden muß, je größer die Zahl der Windungen ist. Nur müssen, damit der Strom auch wirklich sämtliche Drahtwindungen durchläuft, diese von einander isoliert sein; dies erreicht man dadurch, daß man den Draht mit Seide umspinnt.

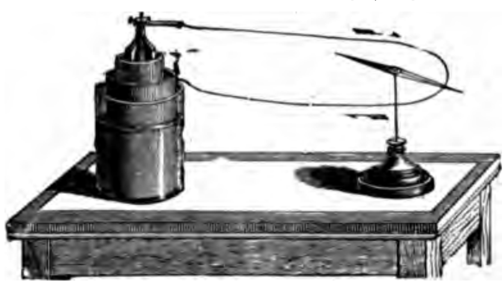


700. Christian Oerstedt.

Hierauf fußend hat Schweigger einen wichtigen Apparat konstruiert, welcher sehr schwache Ströme nachzuweisen ermöglicht, und den er seiner Wirkungsweise gemäß sehr treffend Multiplikator genannt hat. Bevor wir aber diesen Apparat und die vielfachen Modifikationen und Verbesserungen, welche er von den verschiedenen Physikern erfahren hat, beschreiben, wollen wir zunächst einen einfacheren, nicht minder wichtigen, gleichfalls auf der magnetischen Wirkung des Stroms beruhenden Apparat zur Messung der Stromstärke beschreiben, nämlich die Tangentenbussole.

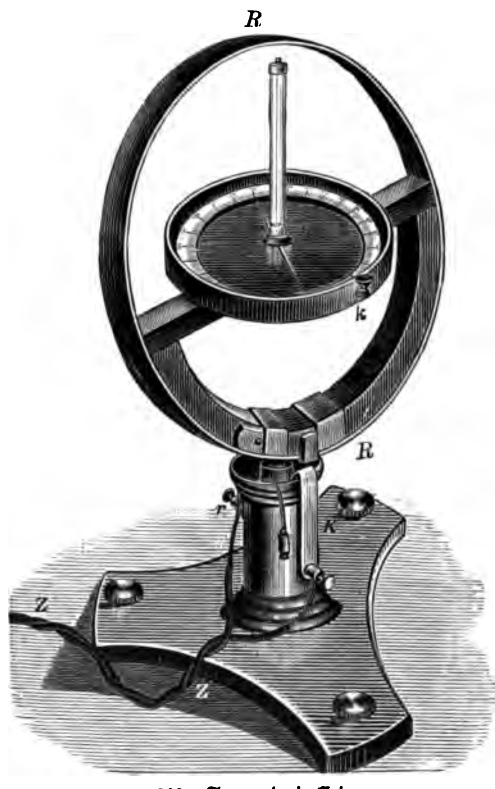
Bei der in Abb. 702 dargestellten Konstruktionsform der Tangentenbussole wird der ablenkende Stromkreis durch einen vertikalen Ring R aus Kupfer gebildet, welcher von einem soliden, durch drei Stellschrauben zu horizontierenden Holzstativ getragen wird. Der Ring ist unten aufgeschnitten und setzt sich in zwei geradlinige, parallel nach unten laufende Kupferstreifen KK (von denen nur einer in der Abbildung sichtbar ist) fort, an welchen die Klemmschrauben zur Aufnahme der Zuleitungsdrähte befestigt sind. Der

Ring ist um eine durch seinen Mittelpunkt gehende vertikale Achse drehbar, um in den magnetischen Meridian eingestellt werden zu können. In der Mitte des Kupferrings befindet sich die mit einer feinen Kreisteilung versehene Bussole. Die kurze Magnetnadel ist mittels eines Kokonfadens aufgehängt und trägt senkrecht zu ihrer Achse einen leichten, bis an die Kreisteilung heranreichenden Aluminiumzeiger, an dessen Enden die relative Lage der Magnetnadel gegen die Kreisteilung abgelesen wird. Mittels des seitlichen Knopfes k kann die Magnetnadel durch einen von unten her gegen sie zu führenden Stift arretiert werden. Auf den Kupferring sind fünf Windungen von gleichmäßigem, wohlisoliertem Kupferdraht neben einander aufgewickelt, welche unten in besondere Klemmschrauben r r endigen und für Messungen schwächerer Ströme benutzt werden. Die Zuleitungsdrähte Z Z werden nahe bei einander und um einander gewunden geführt, um eine direkte ablenkende Wirkung auf die Magnetnadel auszuschließen.



701. Ablenkung der Magnetnadel durch den galvanischen Strom.

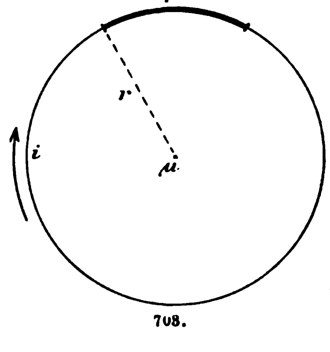
Leitet man durch die Tangentenbussole einen Strom, so wird die Magnetnadel aus dem magnetischen Meridian abgelenkt; die Größe der Ablenkung bietet ein Maß für die Stärke des Stroms. Die Stromstärke i ist nämlich proportional der Tangente des Ablenkungswinkels α, so daß die Gleichung für die Tangentenbussole lautet $i = c . \tan \alpha$. Die Größe c, welche nur von den Dimensionen des Instruments und von der Größe der Horizontalintensität des Erdmagnetismus abhängt, heißt der Reduktionsfaktor der Tangentenbussole. Die Tangentenbussole dient nur zur Messung stärkerer Ströme, zur Messung schwächerer dienen die Multiplikatoren oder die Galvanometer.



702. Tangentenbussole.

Die Kraft, mit welcher ein Teil eines Stromkreises (Abb. 703) auf einen in seinem Mittelpunkt befindlichen Magnetpol μ wirkt, ist nach den Ampère-schen und Biot-Savartschen Gesetzen senkrecht gerichtet gegen die durch den Stromteil und den Magnetpol bestimmte Ebene, und ist proportional der Länge des Stromteils, der Stärke i des Stroms, der Stärke μ des Magnetpols und umgekehrt proportional dem Quadrate des Radius. Ist die Länge des Stromteils gleich dem Kreisradius r, so ist also die Kraft P gleich dem Produkte aus Stromstärke und Polstärke dividiert durch den Radius. Hieraus ergibt sich eine einfache Definition für die Einheit der Stromstärke in absolutem Maße. Setzen wir nämlich $r = 1$ cm, ferner für P die Einheit der Kraft (Dyne) und für μ die Einheit der Polstärke, so erhalten wir als Einheit der Stromstärke diejenige, welche in einem Stromkreise von 1 cm Radius stattfindet, wenn ein Teil der Peripherie, dessen Länge gleich 1 cm ist, auf den im Kreismittelpunkt befindlichen Magnetpol 1 die Kraftwirkung einer Dyne

ausübt. Der zehnte Teil dieser absoluten Stromeinheit ist das Ampère und bildet die praktische Einheit zur Messung von Stromstärken. Eine andere Definition des Ampère wird später gegeben werden.



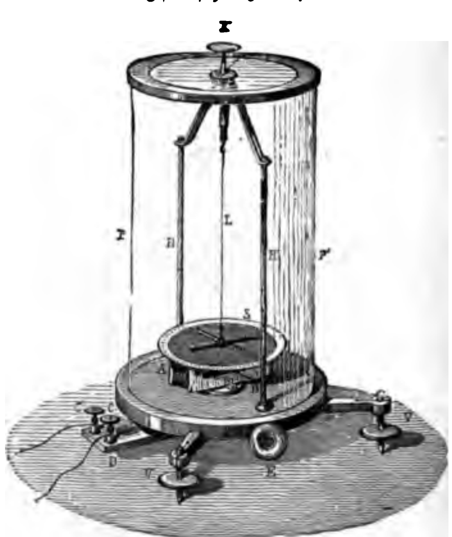
703.

Galvanometer. Der Schweiggersche Multiplikator hat eine wesentliche Verbesserung von dem italienischen Physiker Nobili durch Einführung des von ihm zuerst konstruierten astatischen Nadelpaars erfahren, welches den Zweck hat, die vom Erdmagnetismus herrührende Richtkraft des Magnets zu schwächen und dadurch die ablenkende Wirkung des Stroms zu vergrößern.

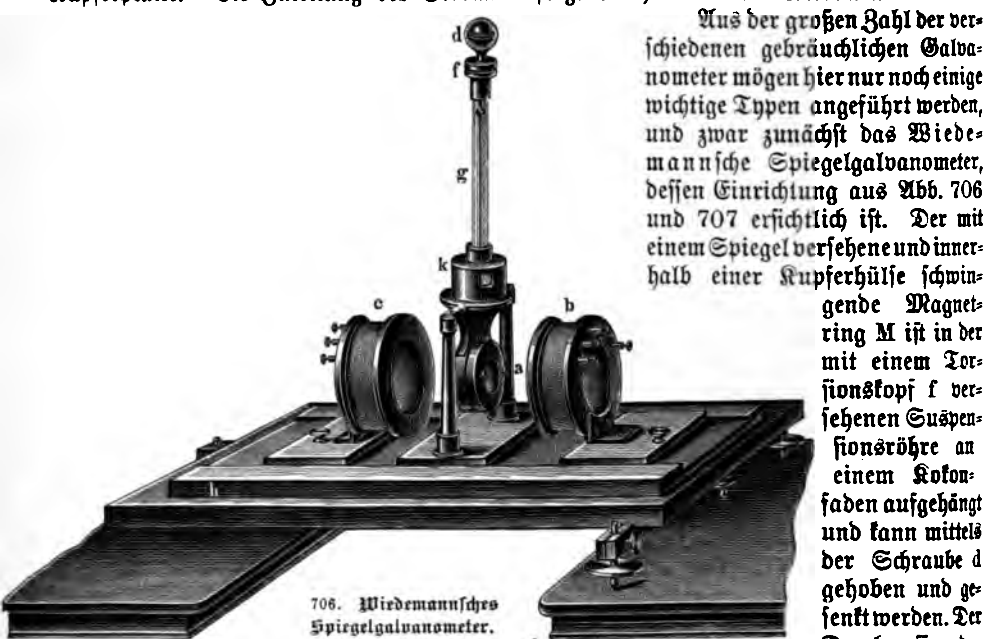
Ein astatisches Nadelpaar (Abb. 704) besteht aus zwei gleichen Magnetnadeln von möglichst gleichem magnetischen Moment, welche in paralleler Lage durch ein vertikales Stäbchen derart mit einander verbunden sind, daß ihre Pole nach entgegengesetzten Richtungen liegen, und daß sie sich als ein starres System um eine gemeinschaftliche Achse drehen. Ein solches System frei aufgehängt, wird keine Tendenz zeigen, eine bestimmte Richtung anzunehmen; es würde, wenn die beiden Magnetnadeln absolut gleich stark magnetisiert wären (was aber in der Praxis nicht ausgeführt wird), in jeder Lage im Gleichgewicht sein; und wenn es aus seiner Gleichgewichtslage durch einen Strom abgelenkt wird, so wird das auf dasselbe ausgeübte, vom Erdmagnetismus herrührende, rücktreibende Drehungsmoment nur sehr klein sein; es wird also auch einer geringeren Kraft bedürfen, um ein solches Magnetsystem aus der Ruhelage abzulenken, als für einen einzelnen Magnet erforderlich wäre. Das Nadelpaar wird nun so aufgehängt, daß eine der beiden Magnetnadeln innerhalb der ablenkenden Rolle, die andere außerhalb derselben sich befindet; infolgedessen wirkt der Strom auf beide Nadeln in demselben Sinne, so daß die ablenkende Wirkung des Stroms noch verdoppelt wird.

704. Astatisches Nadelpaar.

Abb. 705 stellt das Nobilische Galvanometer dar, welches von Nobili und Melloni zu ihren fundamentalen Untersuchungen über strahlende Wärme und später von Physiologen vielfach benutzt worden ist. Das astatische Nadelpaar, welches gewöhnlich für die Beobachtung mit Fernrohr und Skale mit einem Spiegel versehen ist, ist an einem Kokonfaden aufgehängt und kann mittels der Schraube K gehoben und gesenkt werden. Die eine der beiden Nadeln schwingt innerhalb, die andere oberhalb der Drahtrolle. Die Bezeichnung Multiplikator, welche ursprünglich nur für die Drahtrolle angewandt wurde, wird auch auf das ganze Instrument übertragen. Allgemein nennt man die zur Strommessung dienenden Instrumente Galvanometer. Zwischen der Drahtrolle und der oberen Nadel befindet sich eine mit einer Kreisteilung versehene Kupferplatte, die gleichzeitig zur Dämpfung der Schwingungen des Nadelpaars dient. Zur Einstellung des Instruments dreht man, nachdem man es mittels der drei Stellschrauben horizontiert und die Schraube E gelöst hat, die Grundplatte, bis die auf ihr sitzende Drahtrolle sich im magnetischen

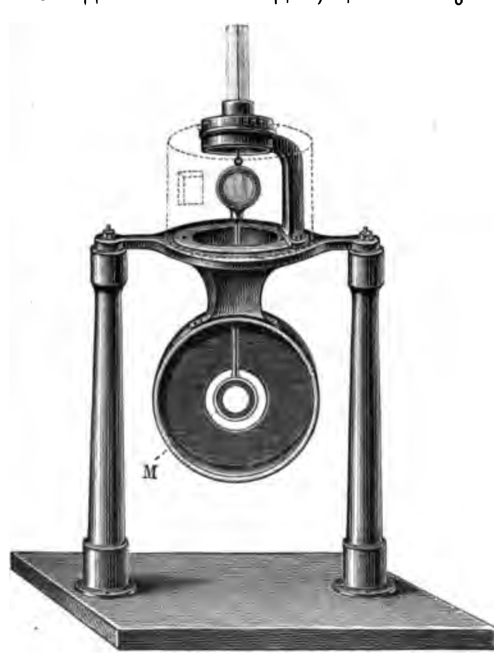

705. Nobilisches Galvanometer.

Meridian befindet; die obere Magnetnadel schwebt alsdann gerade über dem Schlitze der Kupferplatte. Die Zuleitung des Stroms erfolgt durch die beiden Klemmen C und D.



706. Wiedemannsches Spiegelgalvanometer.

Aus der großen Zahl der verschiedenen gebräuchlichen Galvanometer mögen hier nur noch einige wichtige Typen angeführt werden, und zwar zunächst das Wiedemannsche Spiegelgalvanometer, dessen Einrichtung aus Abb. 706 und 707 ersichtlich ist. Der mit einem Spiegel versehene und innerhalb einer Kupferhülse schwingende Magnetring M ist in der mit einem Torsionskopf f versehenen Suspensionsröhre an einem Kokonfaden aufgehängt und kann mittels der Schraube d gehoben und gesenkt werden. Der Durchmesser der beiden Multiplikatoren b und c ist so groß, daß sie sich vollständig über die als Dämpfer dienende Kupferhülse a bis zur Berührung mit dem Querstück verschieben lassen. Die axialen Durchbohrungen des durch einen Vertikalschnitt in zwei gleiche Hälften geteilten Kupferdämpfers können durch Glasplatten verschlossen werden. Der Spiegel, welcher in der Regel sowohl um eine vertikale, als auch um eine horizontale Achse gedreht werden kann, ist durch eine mit einem Fenster versehene Holzbüchse k vor Luftströmungen geschützt.

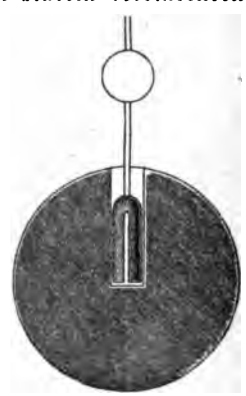


707. Wiedemannsches Spiegelgalvanometer.

Störend für die Beobachtungen mit dem Galvanometer wirkt der Umstand, daß der Magnet eine größere Reihe von Schwingungen ausführt, ehe er seine Ruhelage einnimmt. Um diesen Übelstand zu beseitigen, umgibt man ihn, wie schon angedeutet, mit einer Kupferhülse. In dieser werden nämlich durch die Schwingungen des Magnets, wie wir später sehen werden, Ströme induziert, welche der Bewegung des Magnets entgegenwirken und dieselben daher dämpfen. Eine vollständige Dämpfung erhält man mit dem sogenannten aperiodischen Spiegelgalvanometer von Werner Siemens, bei welchem er zuerst den Glockenmagnet angewandt hat. Derselbe besteht aus einer 1 cm weiten und 3 cm langen Stahlröhre, welche der Länge nach diametral aufgeschlitzt, unten offen und wie ein Hufeisenmagnet magnetisiert ist (Abb. 708). Der Magnet, welcher

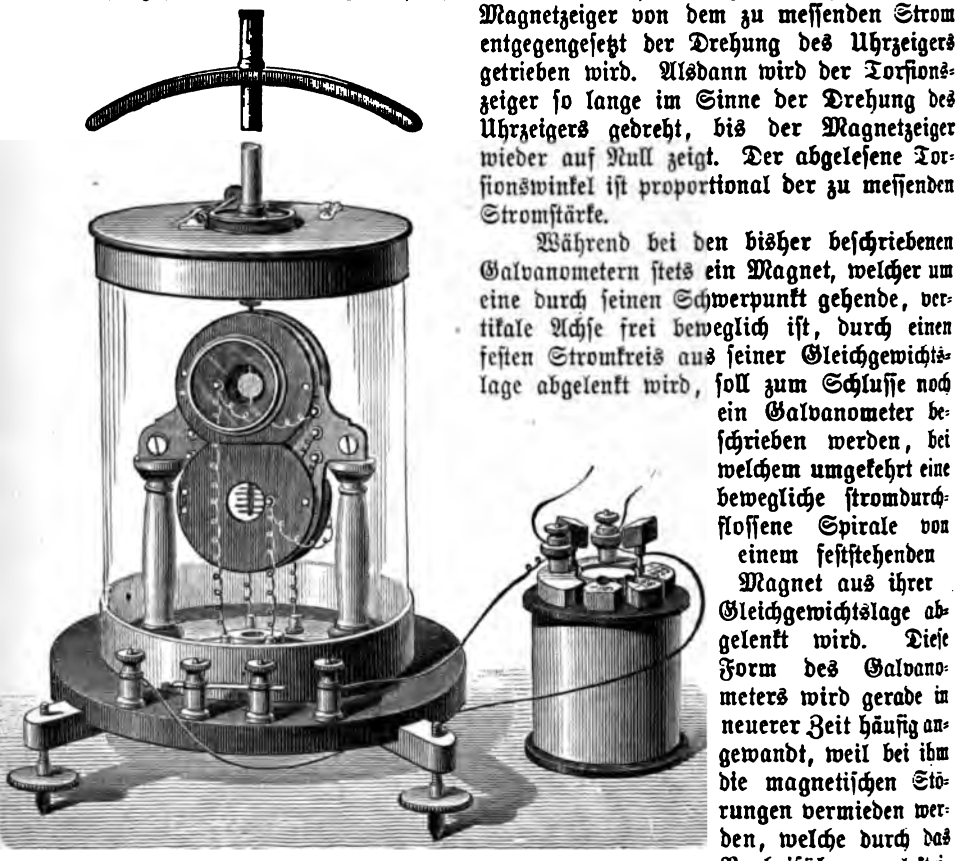
einem aufgeschlitzten Fingerhute ähnelt, ist an seiner oberen Wölbung mit einem Stiel zur Befestigung des Spiegels versehen und schwingt in einer Höhlung, welche in vertikaler Richtung in eine Kupferkugel bis über die Mitte derselben hinaus gebohrt ist. Infolge des geringen Trägheitsmoments, der relativ starken Magnetisierung des Glockenmagnets und der Nähe seiner Pole gegen die Wandungen der ihn eng umschließenden Kupferkugel ist die Dämpfung so stark, daß die Bewegung eine aperiodische ist, d. h. der Magnet, aus seiner Ruhelage abgelenkt, kehrt nach einer einzigen Schwingung in dieselbe zurück.

Eins der ausgezeichnetsten und empfindlichsten elektrischen Präzisionsmeßinstrumente ist das astatische Galvanometer von Sir William Thomson (Lord Kelvin). Bei dem von Elliot Brothers in London nach den Angaben von W. Thomson ausgeführten astatischen Galvanometer (Abb. 709) ist der Spiegel aus einem dünnen, mikroskopischen Deckgläschen hergestellt, während das Magnetsystem durch fünf leichte, flache und kurze (etwa 4 mm lange) Magnete gebildet wird, welche in gleicher Richtung parallel neben einander auf die Rückseite des Deckgläschens geklebt sind. Zwei solcher Magnetsysteme (von denen das eine auf ein Glimmerplättchen aufgeklebt ist) sind durch ein Aluminiumstäbchen zu einem astatischen Paar vereinigt. Jedes der beiden Magnetsysteme befindet sich im Mittelpunkt einer Drahtrolle von kreisförmigem Querschnitt. Jede Rolle besteht aus zwei Hälften, die sich so an einander lehnen, daß sie nur für den die beiden Nadeln verbindenden Aluminiumstab Raum lassen. Der Strom durchfließt die beiden Rollen in entgegengesetzter Richtung, um deren Wirkung zu verstärken. Mittels eines oberhalb der Rollen auf und ab zu bewegenden und durch ein Zahngetriebe zu drehenden, bügelförmigen Richtmagnets kann die Empfindlichkeit des Instruments beliebig geändert werden. Die Schwingungsdauer des Magnetsystems ist sehr klein, die Dämpfung sehr stark. Nach dem Prinzip des Thomsonschen Galvanometers sind astatische Galvanometer konstruiert worden von Werner Siemens (mit einem astatischen Paar von Glockenmagneten) und in neuerer Zeit von vielen anderen, die sich aber im wesentlichen nicht vom Thomsonschen Galvanometer unterscheiden; man ist dabei bestrebt gewesen, die Magnetsysteme noch leichter zu konstruieren und sie nach dem Vorgange von Vernon Boys an möglichst feinen Quarzfäden aufzuhängen.


708 Siemensscher Glockenmagnet.

Zu einem der verbreitetsten Meßinstrumente für wissenschaftliche und technische elektrische Messungen ist in neuerer Zeit das Siemenssche Torsionsgalvanometer geworden, dessen Magnet an einer Spiralfeder befestigt ist. Die drehende Wirkung, welche von dem Strom auf den Magnet ausgeübt wird, wird dadurch aufgehoben, daß man die Spiralfeder in entgegengesetztem Sinne dreht. Der Torsionswinkel der Spiralfeder ist proportional der Intensität des die Galvanometerspirale durchfließenden Stroms; das Instrument dient daher direkt zur Messung von Stromintensitäten, kann aber indirekt bequem auch zur Messung von Spannungsdifferenzen und Widerständen angewandt werden und wird sehr häufig zur Justierung anderer Meßapparate benutzt. Zwischen zwei vertikal stehenden Stromrollen (Abb. 710 u. 711) ist an einem Kokonfaden mittels eines Messingstäbchens ein Glockenmagnet aufgehängt. An dem Stäbchen ist ein leichter, schräg nach oben gerichteter Aluminiumzeiger befestigt, welcher bis an die das Gehäuse des Apparats oben abschließende Glasplatte reicht, auf welche eine Kreisteilung eingeätzt ist. An dem Stäbchen ist ferner das eine Ende einer feinen Spiralfeder f befestigt, deren anderes Ende an einem drehbaren Messingknopf aufgehängt ist, welcher gleichfalls einen horizontalen, über der Kreisteilung der Glasplatte einspielenden Zeiger z trägt. An dem den Glockenmagnet tragenden Stäbchen sind noch zwischen Messingplatten m m zwei Glimmerflügel g g angebracht, welche bei der Ablenkung des Magnets eine starke Luftdämpfung bewirken, so daß derselbe sehr rasch (nach etwa drei Schwingungen) zur Ruhe kommt. Das Instrument wird auf einer soliden Unterlage so aufgestellt, daß der mit N bezeichnete Pol des Magnets ungefähr nach Norden zeigt. Nachdem man also durch Linksdrehen der in die Holzplatte führenden (in

der Abbildung nicht sichtbaren) Schraube die Arretierungsvorrichtung des Magnets gelöst hat, stellt man mittels der drei Stellschrauben das Instrument so ein, daß die am unteren Ende des Magnets befestigte Spitze gerade über dem Schnittpunkte eines darunter angebrachten Kreuzes schwebt. Hierauf stellt man den Torsionszeiger mittels der größeren randrierten Schraube s über der Glasplatte auf den Nullpunkt der Teilung und dreht nach Lösen der Schraube a die Holzplatte und damit die Galvanometerrollen so lange, bis der am Magnet befestigte Zeiger auf Null zeigt oder gleichmäßig um Null schwingt. In dieser Stellung werden die Galvanometerrollen durch die Schraube a festgestellt. Bei der Messung sind die Zuleitungsdrähte so an die Klemmschrauben zu befestigen, daß der Magnetzeiger von dem zu messenden Strom entgegengesetzt der Drehung des Uhrzeigers getrieben wird. Alsdann wird der Torsionszeiger so lange im Sinne der Drehung des Uhrzeigers gedreht, bis der Magnetzeiger wieder auf Null zeigt. Der abgelesene Torsionswinkel ist proportional der zu messenden Stromstärke.



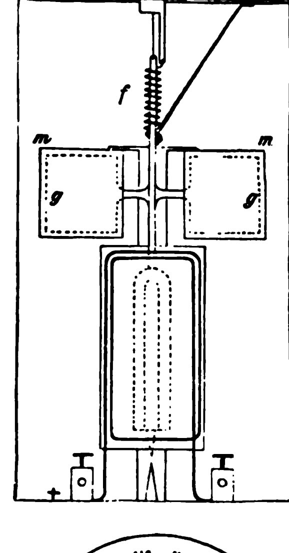
709. Thomsons astatisches Galvanometer.

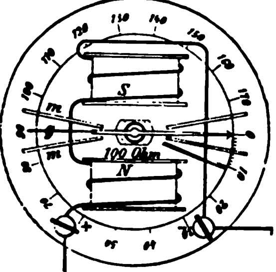
Während bei den bisher beschriebenen Galvanometern stets ein Magnet, welcher um eine durch seinen Schwerpunkt gehende, vertikale Achse frei beweglich ist, durch einen festen Stromkreis aus seiner Gleichgewichtslage abgelenkt wird, soll zum Schlusse noch ein Galvanometer beschrieben werden, bei welchem umgekehrt eine bewegliche stromdurchflossene Spirale von einem feststehenden Magnet aus ihrer Gleichgewichtslage abgelenkt wird. Diese Form des Galvanometers wird gerade in neuerer Zeit häufig angewandt, weil bei ihm die magnetischen Störungen vermieden werden, welche durch das Vorbeiführen elektrischer Bahnen verursacht, die Ausführung genauer Messungen mit Hilfe anderer Galvanometertypen beeinträchtigen.

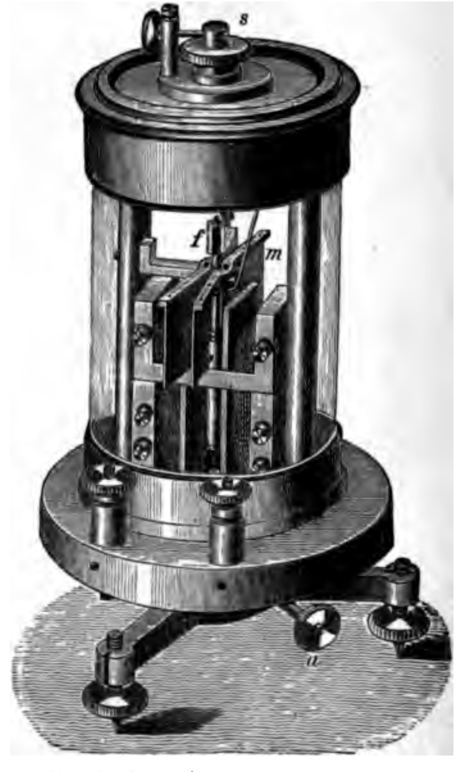
Das nach diesem Prinzipe konstruierte Deprez-d'Arsonvalsche Spiegelgalvanometer hat folgende Einrichtung: Zwischen den Schenkeln eines starken Hufeisenmagnets (Abb. 712) ist ein viereckiger Drahtrahmen zwischen Metalldrähten, welche zugleich zur Stromzuführung dienen, und deren Spannung durch eine mit einer Schraube versehene Feder reguliert werden kann, derart aufgehängt, daß er um eine vertikale (zur Achse des Hufeisenmagnets senkrechte) Achse sich drehen kann. Innerhalb des Rahmens befindet sich ein hohler Cylinder von weichem Eisen, welcher die Intensität des magnetischen Felds noch verstärkt. Fließt ein Strom durch den Rahmen, so wird dieser aus seiner Gleichgewichtslage abgelenkt, und die Größe der Ablenkung, welche ein Maß für die Stromstärke bildet, wird in dem mit dem Rahmen fest verbundenen Spiegel mittels Fernrohr und Skale beobachtet. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird häufig anstatt des

unteren Aufhängungsdrahts ein in Quecksilber tauchender, feiner Platindraht als untere Stromzuführung angewandt.

Abb. 713 und 714 stellt das neueste, von der Firma Siemens und Halske nach Deprez-d'Arsonval konstruierte Spiegelgalvanometer mit feststehendem Magnetsystem und beweglicher Spule dar, und zwar zeigt Abb. 713 das nach Lösen zweier Schrauben herausziehbare Messingrohr, welches den Eisenkern und die bewegliche Spule trägt, Abb. 714 das Magnetsystem, welches von sechs neben einander befindlichen Hufeisenmagneten gebildet wird. Der als dickwandiger Hohlcylinder konstruierte Eisenkern, der sich zwischen den Polschuhen befindet, dient dazu, das Feld möglichst gleichförmig zu gestalten und damit die Proportionalität der Ausschläge zu sichern. In dem Raume zwischen Hohlcylinder und Polschuhen ist an einem feinen, aus Phosphorbronzedraht gewalzten Bande, das gleichzeitig den Spiegel trägt, ein Kupferrahmen, auf dem die Wickelung sich befindet, aufgehängt. Das Metallband und eine am unteren Ende der Spule befestigte, feine Spiralfeder dienen als Stromzuführung. Mit Hilfe einer an der Vorderseite sichtbaren Arretierungsvorrichtung läßt sich beim Transport die bewegliche Spule feststellen.





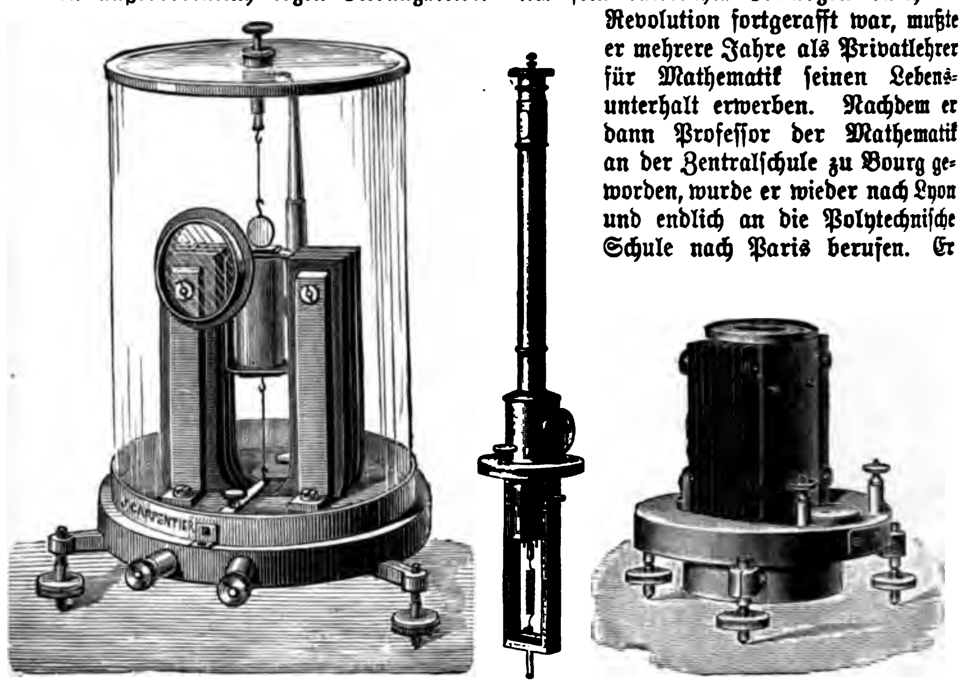


710 u. 711. Siemens'sches Torsionsgalvanometer.

Elektromagnetismus.

Kurz nach der Oerstedtschen Entdeckung ist von dem französischen Physiker Arago im Jahre 1820 gefunden worden, daß Eisen und Stahl magnetisch werden, wenn man sie in die Nähe eines von einem galvanischen Strom durchflossenen Leiters bringt. Taucht man einen von einem galvanischen Strom durchflossenen Draht in Eisenfeilspäne, so werden diese von ihm angezogen und bleiben an ihm haften. Der stromdurchflossene Leiter ruft in seiner Nähe ein magnetisches Kraftfeld hervor und ist, wie sich experimentell nachweisen läßt, seiner ganzen Länge nach von kreisförmigen Kraftlinien umgeben, deren Mittelpunkte auf der Achse des Leiters liegen, und deren Ebenen ihn senkrecht durchsetzen. Die magnetische Wirkung wird noch verstärkt, wenn man einen stromdurchflossenen Leiter anwendet, der aus einer größeren Anzahl von parallelen, nahe an einander liegenden und von einander isolierten, kreisförmigen Windungen besteht. Man nennt ein solches Gebilde Solenoid nach dem Vorgange des berühmten französischen Physikers Ampère.

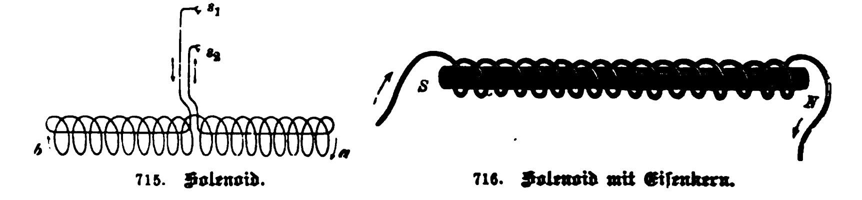
Ampère, dessen Name mit der Geschichte des Elektromagnetismus auf unvergängliche Weise verbunden ist, gehört, obwohl die Zahl der Arbeiten, welche er der Wissenschaft geschenkt hat, eine verhältnismäßig geringe ist, doch zu den bedeutendsten Physikern, die je gelebt haben. Er ist zu Lyon am 22. Januar 1775 geboren und zeigte schon früh einen außerordentlich regen Bildungstrieb. Als sein väterliches Vermögen durch die Revolution fortgerafft war, mußte er mehrere Jahre als Privatlehrer für Mathematik seinen Lebensunterhalt erwerben. Nachdem er dann Professor der Mathematik an der Zentralschule zu Bourg geworden, wurde er wieder nach Lyon und endlich an die Polytechnische Schule nach Paris berufen. Er starb am 10. August 1836 auf einer Reise, die er als Generalinspektor der Universitäten unternommen hatte. Außer seinen berühmten Arbeiten auf dem Gebiete der Elektrizität hat er einzelne Probleme der Mechanik, der Optik und auch der Wahrscheinlichkeitsrechnung behandelt, welche durchweg den Stempel des Klassischen an sich tragen.



712. Deprez-d'Arsonvalsches Spiegelgalvanometer.

713 u. 714. Spiegelgalvanometer nach Deprez-d'Arsonval, konstruiert von Siemens und Halske.

Ein solches Solenoid verhält sich genau wie ein Magnet. Denn hängen wir es an den beiden Enden s_1 und s_2 (Abb. 715) in zwei Quecksilbernäpfchen derart auf, daß es sich



715. Solenoid.

716. Solenoid mit Eisenkern.

um die durch s_1 und s_2 gehende Vertikale frei drehen kann, und leiten einen Strom hindurch, so stellt es sich mit seiner Längsrichtung in den magnetischen Meridian, genau wie ein Magnet; seine einzelnen Kreiswindungen stehen senkrecht zum magnetischen Meridian. Auch in seinen anderen Kraftwirkungen äußert es sich wie ein Magnet. Nähern wir z. B. den Nordpol eines Magnets dem Solenoid, so wird das eine Ende desselben angezogen, während das andere abgestoßen wird. Welches Ende angezogen und welches abgestoßen wird, hängt von der Richtung des das Solenoid durchfließenden Stroms ab. Dies übereinstimmende Verhalten zwischen Magneten und elektrischen

Strömen führte Ampère zu der Theorie, daß die Ursache des Magnetismus in elektrischen Molekularströmen zu suchen sei, welche in dem magnetischen Körper dessen kleinste Teilchen stets in derselben Richtung umkreisen. Auch das sonstige Verhalten eines stromdurchflossenen Solenoids stimmt mit dem eines Magnets vollständig überein. Nicht nur daß es Eisen anzieht, und zwar an den beiden Enden mit der größten Kraft, in der Mitte dagegen gar nicht, induziert es auch in Eisen und Stahl Magnetismus. Ein Eisenstab in eine von einem Strom durchflossene, isolierte Spirale gesteckt (Abb. 716), verstärkt die Wirkung derselben auf die Magnetnadel oder auf einen stromdurchflossenen, beweglichen Leiter in erheblichem Maße. Der Eisen- oder Stahlstab wird dabei selbst sehr stark magnetisch, und zwar in der Weise, daß er an demselben Ende wie das Solenoid einen Nordpol, an dem anderen einen Südpol erhält. Nach der Ampèreschen Regel ist stets dasjenige Ende des Stabes ein Nordpol, welches man zur linken Hand hat, wenn man sich in dem Draht des Solenoids in der Richtung des positiven Stroms mit dem Gesicht dem Magnetstab zugewandt schwimmend denkt. Demgemäß wird in dem Eisenstab der Abb. 716 links ein Südpol, rechts ein Nordpol erzeugt.

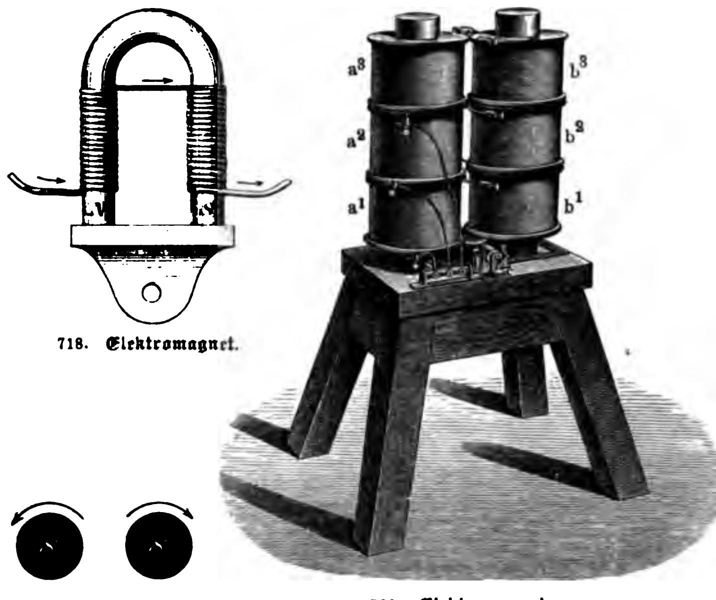


717. André Marie Ampère.

Weiches Eisen verliert seinen Magnetismus sogleich wieder, wenn der Strom unterbrochen wird; bei Stahl dagegen bleibt der magnetische Zustand auch nach dem Aufhören des Stroms in der Spirale noch bestehen; man wendet deshalb stromdurchflossene Magnetisierungsspiralen jetzt allgemein an, um kräftige Stahlmagnete zu erzeugen. Wichtiger aber als diese sind die Elektromagnete, das sind Stäbe aus weichem Eisen, welche von einer stromdurchflossenen Spirale umgeben sind und nur zeitweilig magnetisch sind, nämlich so lange, als in der Spirale der Strom zirkuliert. Ebenso wie ein gerader Stab, kann natürlich auch ein hufeisenförmig gebogener Stab aus weichem Eisen magnetisiert werden. Man denke sich nämlich die Enden eines zunächst geradlinigen Eisenstabes in derselben Richtung von einer Spirale umwunden, hernach den Stab hufeisenförmig gebogen (Abb. 718) und dann durch die Spirale einen Strom in der durch die Pfeile angedeuteten Richtung gesandt, so erhält man einen Hufeisenelektromagnet, welcher zufolge der Ampèreschen Regel links seinen Nordpol und rechts seinen Südpol hat. Übereinstimmend mit der Ampèreschen Regel ist die von Dove gegebene, daß wenn man die Pole des Elektromagnets von oben ansieht (Abb. 719), derjenige der Nordpol ist, um welchen der positive Strom entgegengesetzt der Bewegung des Uhrzeigers kreist, und derjenige der Südpol, um welchen der positive Strom im Sinne der Bewegung des Uhrzeigers strömt.

Die Stärke der Magnetisierung nimmt mit der Anzahl n der Windungen und mit der Stärke i des magnetisierenden Stroms zu. Wird letztere in Ampère gegeben, so pflegt man das Produkt n.i die Anzahl der Ampèrewindungen zu nennen.

Mit dem Aufhören der magnetisierenden Kraft verschwindet auch beim weichen Eisen der Magnetismus nicht sofort, sondern bleibt noch eine gewisse meßbare Zeit bestehen. Die auf dieser Thatsache beruhenden Erscheinungen der Hysteresis sind bereits S. 488 erwähnt worden.

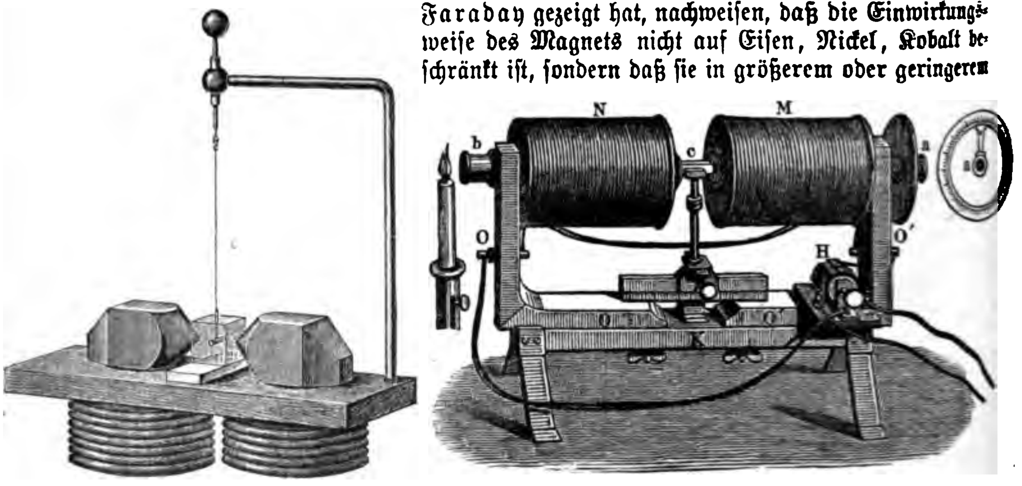


718. Elektromagnet.

719.

720. Elektromagnet.

Man kann auf die vorhin angegebene Weise außerordentlich starke Elektromagnete herstellen. Eine der gebräuchlichsten Formen ist durch Abb. 720 dargestellt. Zwei vertikale Eisencylinder sind durch eine horizontale Eisenplatte mit einander verbunden. Jeder der Eisenkerne ist von drei Magnetisierungsspiralen umgeben, die mit Klemmschrauben versehen sind, um verschiedene Schaltungsweisen (hinter-, neben einander oder gemischt) zu ermöglichen. Mittels des Ruhmkorffschen Kommutators c kann die Richtung des Stroms beliebig gewechselt werden. Mit Hilfe eines solchen Elektromagnets mit passend zugespitzten Ankern und einer geeigneten Aufhängungsvorrichtung (wie sie z. B. Abb. 721 darstellt) läßt sich, wie Faraday gezeigt hat, nachweisen, daß die Einwirkungsweise des Magnets nicht auf Eisen, Nickel, Kobalt beschränkt ist, sondern daß sie in größerem oder geringerem

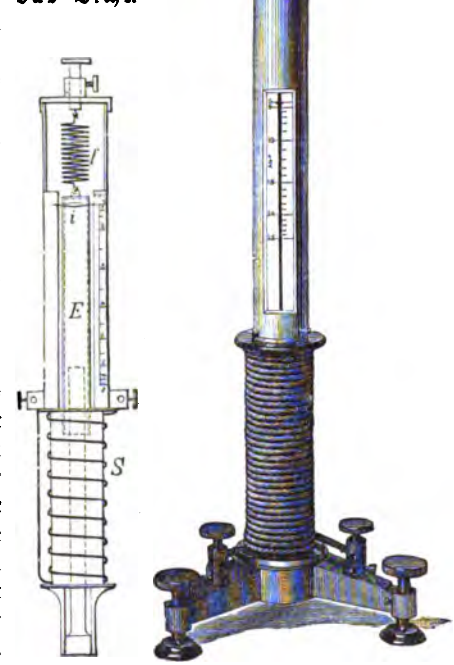


721. Aufhängungsvorrichtung für den Elektromagnet. 722. Ruhmkorffscher Elektromagnet.

Grade auf fast alle Substanzen stattfindet, und daß wir zwei Hauptgruppen von Körpern unterscheiden können, nämlich solche, welche von einem Magnetpol angezogen werden, wie Eisen, und solche, welche abgestoßen werden, wie Wismut. Die ersteren nennt man paramagnetisch, die zweiten diamagnetisch. Ein Stäbchen aus einer paramagnetischen Substanz zwischen die Anker des von einem hinreichend starken Strome gespeisten Magnets gebracht, stellt sich mit seiner Längsrichtung achsial, d. h. in die Verbindungslinie der

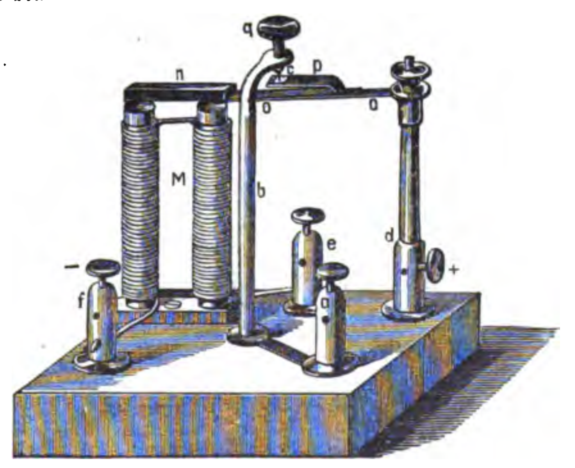
Pole, während ein Stäbchen aus einer diamagnetischen Substanz sich äquatorial, d. h. senkrecht zu jener Verbindungslinie stellt. Eisen, Nickel, Kobalt, Platin sind z. B. paramagnetische, Kupfer, Zink, Antimon, Wismut diamagnetische Substanzen. Von Flüssigkeiten ist z. B. Eisenchloridlösung paramagnetisch, destilliertes Wasser dagegen diamagnetisch, die Mehrzahl der Gase ist mit Ausnahme des Sauerstoffs diamagnetisch.

Einwirkung des Magnetismus auf das Licht. Im Jahre 1845 machte Faraday die für den Zusammenhang zwischen Licht- und elektrischen Erscheinungen wichtige Entdeckung der „Magnetisierbarkeit des Lichtstrahls“. Er fand, daß durchsichtige Körper unter dem Einflusse einer starken magnetisierenden Kraft die Fähigkeit erlangen, die Polarisationsebene des Lichts zu drehen.



723. Prinzip des Federgalvanometers. 724. Kohlrauschs Federgalvanometer.

Zur Ausführung dieses Versuchs und auch für quantitative Bestimmungen eignet sich eine von Ruhmkorff angegebene Konstruktion des Elektromagnets (Abb. 722). Zwei sehr starke, horizontal gelagerte Elektromagnete M und N, welche auf ihrer Unterlage K gegen einander verschoben und in jeder Lage mittels zweier Flügelschrauben festgeklemmt werden können, sind mit einander derart verbunden, daß, wenn ein von einer starken Batterie gelieferter Strom, welcher mittels des Kommutators H nach der einen oder anderen Richtung geschlossen werden kann, sie durchfließt, an den beiden einander zugekehrten Enden der Spiralen ungleichnamige Pole erzeugt werden. Die Anker des Elektromagnets sind der Länge ihrer Achse nach durchbohrt. In b und a befinden sich zwei Nicolsche Prismen; das erste, vor welchem eine Lichtquelle, etwa eine Natriumflamme, aufgestellt ist, dient als Polarisator, das zweite kann als Analysator mittels einer Alhydade gedreht und die Größe der Drehung an einem geteilten Kreise abgelesen werden. Man bringt zwischen die Pole des Elektromagnets das durchsichtige Medium c und dreht den Analysator so lange, bis das Gesichtsfeld für den durch den Analysator nach der Lichtquelle hinschauenden Beobachter vollständig dunkel erscheint; die Hauptschnitte der beiden Nicols stehen alsdann senkrecht auf einander. Erregt man nun den Magnet, so wird das Gesichtsfeld wieder erhellt; dreht man dann den Analysator, bis wieder vollständige Dunkelheit des Gesichtsfelds eintritt, so kann man an dem Teilkreise ablesen, um welchen Winkel die Polarisationsebene des Lichtstrahls um seine Fortpflanzungsrichtung als Achse durch den Magnet gedreht worden ist.



725. Wagner-Neefscher Selbstunterbrecher.

Faraday hat gefunden, daß die Drehung der Polarisationsebene nach der Richtung erfolgt, in welcher der positive Strom die Windungen der Spirale durchfließt, daß ihre

Größe proportional ist der Länge der durchstrahlten Schicht, ferner proportional der Intensität des magnetisierenden Stroms, und daß sie abhängig ist von der Natur des durchstrahlten Mediums. Das elektromagnetische Drehungsvermögen des Schwefelkohlenstoffs wird häufig zur Messung der Intensität starker Ströme und starker magnetischer Kraftfelder angewandt.

Einwirkung eines Solenoids auf weiches Eisen. Befindet sich in der Verlängerung der Achse eines Solenoids (Abb. 723) S ein Stab E aus weichem Eisen an einer Spiralfeder f aufgehängt, so wird er, wenn durch das Solenoid ein Strom geschickt wird, so magnetisiert, daß er von dem Solenoid angezogen, und wenn der Strom stark genug ist, in dasselbe hineingezogen wird. Die Kraft, mit welcher die Hineinziehung erfolgt, ergibt sich nach den Versuchen von Hankel und Dub proportional dem Quadrate der Stromstärke und dem Quadrate der Windungszahl, so daß bei gegebener Windungszahl aus der Tiefe des Einsinkens auf die Stromstärke geschlossen werden kann. Hierauf beruht die Einrichtung eines einfachen Strommeßapparats, des sogenannten Federgalvanometers von Kohlrausch (Abb. 724), bei welchem ebenfalls eine an einer Spiralfeder aufgehängte Eisenröhre in ein stromdurchflossenes Solenoid hineingezogen wird, und die Tiefe des Eindringens an einer empirisch graduierten Skale ein Maß für die Stromstärke liefert.



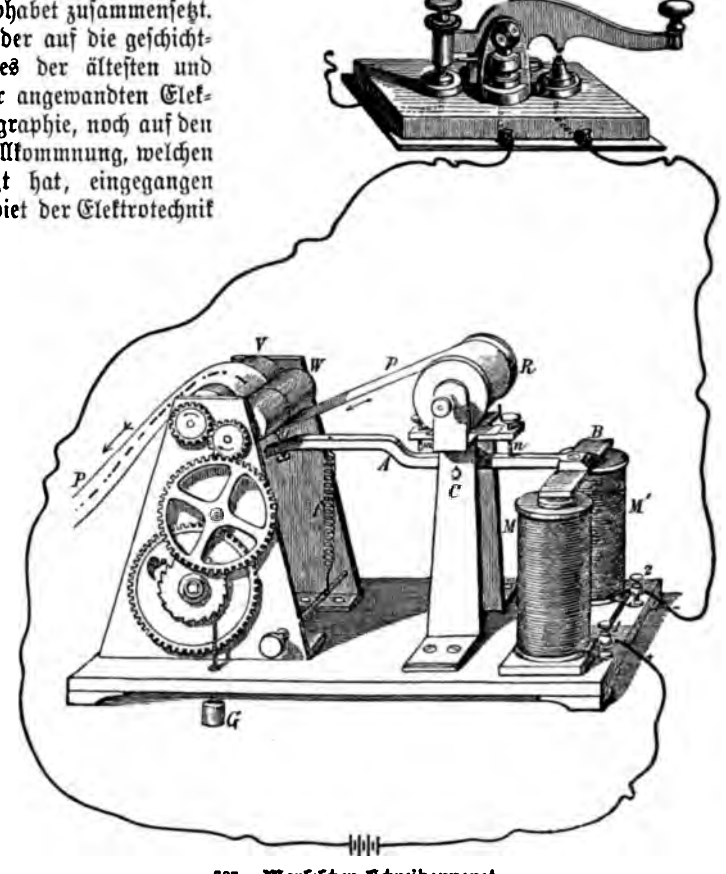
726. Samuel Morse.

Der selbstthätige Unterbrecher. Auf der Eigenschaft des weichen Eisens, zum Elektromagnet zu werden durch einen Strom und bei Aufhören desselben wieder den Magnetismus zu verlieren, beruht die Konstruktion des selbstthätigen Unterbrechers, einer kleinen, wichtigen Maschine, durch welche auf sehr sinnreiche Weise ein Strom in schnellen Perioden selbstthätig geschlossen und geöffnet wird.

In Abb. 725 ist ein Wagner-Neefscher Selbstunterbrecher dargestellt, welcher durch seine hin- und hergehende Bewegung den Strom abwechselnd schließt und öffnet. M ist der Elektromagnet, dessen Schenkel, um einen raschen Wechsel des Magnetismus zu ermöglichen, aus eisernen Röhren hergestellt und nur an den Enden durch massive eiserne Kappen geschlossen sind; der Anker n ist an einer Messingfeder o o befestigt, deren rechtes Ende festgeklemmt ist, und auf welcher eine kleine schwache Feder p mit aufgelötetem Platinblech c sitzt. Dieses drückt bei geöffnetem Strom gegen die in eine Platinspitze endigende, in den Messingstab b eingesetzte Schraube q. Die Enden des um den Elektromagnet gewickelten Drahts führen zu den Klemmen e und f. Verbindet man die Klemmen a und e durch einen Draht und führt zu den Klemmen d und f die Pole einer Batterie, so wird dadurch der Strom geschlossen, infolgedessen der Elektromagnet M erregt und der Anker n angezogen; dadurch wird der Kontakt bei c unterbrochen und der Strom geöffnet; dadurch fällt der Anker zurück und schließt wieder den Strom u. s. w.; es wird so durch den Strom selbst eine oscillierende Bewegung erzeugt, durch welche er abwechselnd geschlossen und geöffnet wird.

Der Morsesche Apparat. Denken wir uns den Anker n des kleinen Elektromagnets als den einen Arm eines zweiarmigen, durch eine Feder f festgehaltenen Hebels (Abb. 727), dessen zweiter Arm einen Stift o tragen möge, welcher beim Erregen des Elektromagnets gegen einen durch ein Uhrwerk vorbeigezogenen Papierstreifen gedrückt wird, so haben wir das Prinzip des Morseschen Schreibtelegraphen. Wird der Strom geöffnet, so zieht die Feder den Anker n vom Elektromagnet und also auch den Schreibstift vom Papier fort. Je nachdem man mittels eines geeigneten Stromschlüssels T, des sogenannten Tasters, kürzere oder längere Zeit schließt, erhält man auf dem Papierstreifen Punkte oder Striche, aus denen sich bekanntlich das Morsesche Alphabet zusammensetzt.

Es kann hier weder auf die geschichtliche Entwickelung eines der ältesten und wichtigsten Zweige der angewandten Elektrizitätslehre, der Telegraphie, noch auf den hohen Grad der Vervollkommnung, welchen dieselbe heute erlangt hat, eingegangen werden, da dieses Gebiet der Elektrotechnik in einem besonderen Bande dieses Werkes seine Behandlung findet.



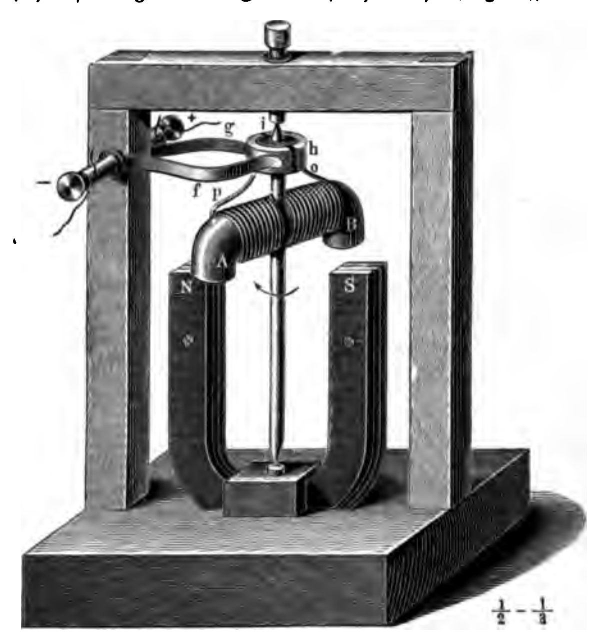
727. Morsescher Schreibapparat.

Aus demselben Grunde wollen wir uns darauf beschränken, aus den mannigfachen Anwendungen des Elektromagnetismus zur Konstruktion von Bewegungsmechanismen, zum Schlusse dieses Kapitels nur noch eine der ältesten Maschinen zu beschreiben, welche die Umsetzung des galvanischen Stroms in mechanische Energie ermöglicht, nämlich die **Ritchiesche Maschine.** Abb. 728 auf folgender Seite stellt Ritchies elektromagnetische Maschine vor. Sie besteht aus einem permanenten, hufeisenförmigen Stahlmagnet N S mit nach oben gekehrten Schenkeln, in deren Mitte sich eine vertikale, stählerne, in Spitzen laufende Achse befindet, welche einen hufeisenförmigen Elektromagnet A B trägt, dessen Pole bei der Rotation gerade über den Polen des permanenten Magnets fortgehen. Die Achse trägt ferner einen kleinen, zweiteiligen Kommutator, auf dessen von einander isolierten, metallnen Halbringen h und i die beiden Enden o und p der Magnetisierungsspirale befestigt sind, und auf denen die Stromzuleitungsfedern f nnd g schleifen. Bei der in der Abbildung angegebenen Richtung des magnetisierenden Stroms wird A ein Südpol und also von N angezogen, während der Nordpol B von S angezogen wird; der Elektromagnet wird sich infolgedessen in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung drehen. In dem Momente nun, in welchem die Pole des Elektromagnets über die des Stahlmagnets fortgehen, tritt durch den Kommutator Stromwechsel ein, A wird jetzt von N und ebenso B von S abgestoßen, und die Rotation erfolgt, indem sich der Vorgang

nach jeder halben Umdrehung wiederholt, stets in derselben Richtung. Durch ein Zahnradgetriebe kann die Rotation der Achse auf ein Schwungrad übertragen und demgemäß Elektrizität in mechanische Energie umgesetzt werden.

Chemische Wirkungen des galvanischen Stroms.

Bei der Fortleitung des galvanischen Stroms unterschieden wir bereits Leiter erster Klasse, welche durch den galvanischen Strom keine wesentliche Änderung erleiden, und Leiter zweiter Klasse, welche durch den galvanischen Strom chemisch verändert, nämlich in ihre Bestandteile zerlegt werden, die sich an den Stromzuführungsstellen ausscheiden. Taucht man einen Zink- und einen Platinstreifen in verdünnte Schwefelsäure und verbindet sie durch einen Schließungsdraht, so finden in dem so gebildeten Element chemische Vorgänge statt: Der im Wasser enthaltene Sauerstoff verbindet sich mit dem Zink zu Zinkoxyd und dieses mit der Schwefelsäure zu schwefelsaurem Zinkoxyd, während der frei gewordene Wasserstoff an dem Platinstreifen aufsteigt. Das Zinkoxyd löst sich beständig von der Zinkoberfläche los; infolgedessen wird von



728. Ritchies elektromagnetische Maschine.
(Zu Seite 553 gehörig.)



729. Hofmannsches Voltameter.

der reinen Zinkoberfläche immer von neuem Sauerstoff angezogen und das so gebildete Zinkoxyd wieder aufgelöst. Solange noch Zink sich auflösen kann, so lange zirkuliert in dem Schließungskreis ein galvanischer Strom. Aber nicht nur in dem galvanischen Element selbst werden durch den galvanischen Strom chemische Prozesse hervorgerufen, sondern in allen stromdurchflossenen Leitern zweiter Klasse. Verbindet man die Endpole einer aus mehreren, hinter einander geschalteten Elementen bestehenden Batterie mit zwei Platinstreifen und taucht sie in angesäuertes Wasser, so wird dieses, wie zuerst Nicholson und Carlisle bald nach der Entdeckung der Voltaschen Säule im Jahre 1800 zeigten, in seine Bestandteile zersetzt, und zwar entwickelt sich an dem mit dem positiven Pol der Batterie verbundenen Platinstreifen Sauerstoff, an dem mit dem negativen Pol der Batterie verbundenen Platinstreifen Wasserstoff. Die Zersetzung findet anscheinend nur an den Stromzuführungsstellen statt, an anderen Stellen ist keine Spur einer chemischen Zersetzung oder Gasentwickelung wahrnehmbar. Der Vorgang läßt sich nach Grotthuß folgendermaßen erklären: Durch den galvanischen Strom werden, wenn er hinreichend

stark ist, die zu Wassermolekülen verbundenen Sauerstoff- und Wasserstoffatome von einander getrennt; jedes frei gewordene Wasserstoffatom verbindet sich mit dem Sauerstoffatom des ihm nächst benachbarten Wassermoleküls, hierdurch wird wieder das mit jenem Sauerstoffatom verbunden gewesene Wasserstoffatom frei, welches wieder zersetzend auf das nächst benachbarte Wassermolekül wirkt; und dieser Vorgang schreitet von Molekül zu Molekül fort bis zu den Elektroden, bis das Wasserstoffatom des letzten Wassermoleküls kein Sauerstoffatom mehr vorfindet, mit dem es sich vereinigen könnte, und deshalb in Gasform an der negativen Elektrode frei wird. Im Innern der Flüssigkeit ist keine Gasentwickelung wahrnehmbar, weil jeder Zersetzung der Wassermoleküle sofort wieder eine Wiedervereinigung folgt. Eine andere Erklärungsweise, welche sich den Thatsachen besser anzupassen scheint, liefert die alsbald (S. 556) zu besprechende Dissociationstheorie.

Um die entwickelten Gase einzeln aufzufangen, kann man sich zweckmäßig eines einfachen, von A. W. Hofmann angegebenen Apparats, des sogenannten Hofmannschen Voltameters bedienen (Abb. 729).



730. Sir Humphrey Davy.

In die beiden graduierten und durch Hähne verschließbaren Schenkel eines U-förmigen Rohrs AB sind unten Platindrähte p und p' eingeschmolzen, welche sich in Platinbleche fortsetzen. Von der unteren Biegungsstelle zweigt sich eine vertikale, oben zu einer Kugel K erweiterte Röhre R ab. Nachdem der Apparat mit angesäuertem Wasser gefüllt ist, werden die Hähne h und h' geschlossen. Verbindet man nun die Platindrähte mit den Endpolen der Batterie, so steigen die beiden Gase von den Platinblechen aus in die geteilten Röhren auf und treiben die Flüssigkeit in die mittlere Röhre hinauf. Der Versuch zeigt, daß das Volumen des (in der Röhre B) entwickelten Wasserstoffs doppelt so groß ist, als das Volumen des (in der Röhre A) entwickelten Sauerstoffs. Die Zersetzung findet also nach denselben Verhältnissen statt, nach welchen sich Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser vereinigen.

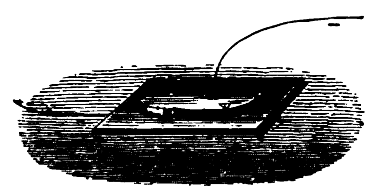
Im Jahre 1807 gelang es Humphrey Davy, die Zersetzbarkeit der Alkalien und Erden, welche man bis dahin für elementare Körper gehalten hatte, nachzuweisen und zu zeigen, daß sie Oxyde, d. i. einfache Verbindungen gewisser Metalle mit Sauerstoff sind. In der Pottasche fand er das Kalium, in der Soda das Natrium; Calcium, Magnesium, Aluminium und Silicium wurden als die Hauptbestandteile der Kalk-, der Talk-, der Thonerde und des Kiesels erkannt, Thatsachen, welche für die Entwickelung der Chemie von hervorragendster Bedeutung waren.

Bei Anwesenheit der atmosphärischen Luft ist es nicht möglich, Kalium oder Natrium in gediegenem Zustande längere Zeit zu erhalten. Ihre Verwandtschaft zum Sauerstoff ist so groß, daß sie denselben aus der Luft an sich reißen und sich mit ihm verbinden. Deswegen findet man diese Elemente auch nicht in der Natur in gediegenem Zustande, und es hat langer Zeit und einer hohen Ausbildung der Wissenschaft bedurft, um sie aus ihren Verbindungen darzustellen. Davy gelang es, indem er einen Block Pottasche

(geschmolzen und wasserfrei) mit dem positiven Pol einer starken galvanischen Batterie verband und den negativen Pol in eine mit Quecksilber ausgefüllte Höhlung dieses Blocks leitete (Abb. 731). Das am negativen Pol sich ausscheidende Kalium, welches bei früheren Versuchen infolge seiner Ausscheidung in sehr fein verteiltem Zustande immer verbrannte, fand jetzt in dem Quecksilber einen Körper, der es vor den Einwirkungen der Luft schützte, und mit dem es sich zu Kaliumamalgam verbinden konnte; aus diesem erhielt dann Davy das Kalium durch Abdestillieren des Quecksilbers. In gleicher Weise gewann Davy das Natrium durch Einwirkung des galvanischen Stroms auf Soda in geschmolzenem Zustande.

Leitet man den galvanischen Strom mittels zweier Platinstreifen in eine Chlornatriumlösung, so wird sowohl das Wasser, als auch das Salz zersetzt; an dem mit dem positiven Pol der Batterie verbundenen Platinstreifen entwickelt sich Sauerstoff und Chlor, während Natrium und Wasserstoff sich an dem mit dem negativen Pol der Batterie verbundenen Platinstreifen ausscheiden. Aus jeder Salzlösung, durch welche ein galvanischer Strom geleitet wird, scheidet sich das Metall (als elektropositiver Körper) stets an der mit dem negativen Pol der Batterie verbundenen Zuleitungsstelle ab, während sich der Sauerstoff (als elektronegativer Körper) stets an der mit dem positiven Pol der Batterie verbundenen Zuleitungsstelle entwickelt. War die Kochsalzlösung durch Lackmustinktur blau gefärbt, so läßt sich, da Chlor ein starkes Entfärbungsmittel ist, aus dem Auftreten der Entfärbung auf Chlorentwickelung schließen.

Leitet man die Pole der Batterie auf einen Streifen von Fließpapier, welches mit einer Lösung von Jodkalium getränkt ist, so scheidet sich das Jod, wie man aus der Bräunung erkennen kann, an dem positiven Pol aus, während metallisches Kalium am negativen Pol frei wird.



731. Davys Zersetzung der Alkalien.

Leitet man einen galvanischen Strom in eine mit Lackmustinktur gefärbte schwefelsaure Sodalösung, so wird die Soda von der Schwefelsäure getrennt, wie sich aus der am positiven Pole auftretenden roten Färbung erkennen läßt.

Man nennt den Vorgang der Zersetzung zusammengesetzter Körper durch den galvanischen Strom nach der von Faraday eingeführten Nomenklatur Elektrolyse und die Substanz, welche durch den Strom zersetzt wird, Elektrolyt. Die Enden der Leitung, durch welche der galvanische Strom dem Elektrolyt zugeführt wird, heißen Elektroden (ὁδός der Weg), und zwar heißt die mit dem positiven Pol der Batterie verbundene Elektrode die positive Elektrode oder Anode (ἀνά herauf) und die mit dem negativen Pol der Batterie verbundene die negative Elektrode oder Kathode (κατά herab). Die Bestandteile, in welche der Elektrolyt durch den galvanischen Strom zerlegt wird, nennt man Jonen (ἰέναι gehen, wandern), und zwar dasjenige Jon, welches sich an der positiven Elektrode abscheidet, den elektronegativen Bestandteil des Elektrolyten oder das Anion, und dasjenige Jon, welches sich an der negativen Elektrode abscheidet, den elektropositiven Bestandteil oder das Kation. Die Art und Weise, in welcher der galvanische Strom durch den von ihm zersetzten Elektrolyten fortgeleitet wird, bezeichnet man als elektrolytische Leitung oder Leitung durch Elektrolyse.

In neuerer Zeit neigt man zur Erklärung der elektrolytischen Leitung, anstatt der Grotthußschen Theorie (vgl. S. 554) einer von Rudolf Clausius aufgestellten und von Svante Arrhenius weiter ausgebildeten Theorie zu, der zufolge ein Teil der Moleküle eines Elektrolyten, auch wenn er nicht von einem Strom durchflossen ist, in mit Elektrizität geladene, freie Jonen gespalten ist. Trotz dieser Ladungen erscheint der Elektrolyt, da die Volumeneinheit desselben ebenso viel Anionen wie Kationen enthält, deren einzelne Ladungen mit negativer, beziehungsweise mit positiver Elektrizität, ihrem absoluten Werte nach einander gleich sind, unelektrisch. Wird nun der Elektrolyt von einem Strom durchflossen, so wird durch die elektrische Kraft eine Bewegung der freien Jonen bewirkt, und zwar werden die mit negativer Elektrizität geladenen Anionen nach der Anode, die mit positiver Elektrizität geladenen Kationen nach der Kathode getrieben. Die Jonen geben

ihre Ladungen an die Elektroden ab und sind, nachdem sie auf diese Weise unelektrisch geworden, die Produkte der Elektrolyse.

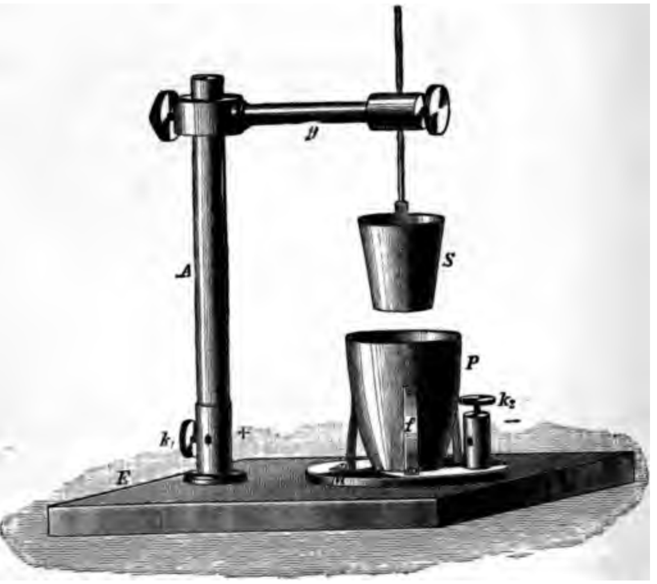
Die Gesetze der elektrolytischen Wirkung des galvanischen Stroms sind von Faraday aufgefunden worden und lauten:

Die von einem galvanischen Strom zersetzte Menge eines Elektrolyten ist proportional der Stärke und Zeitdauer des Stroms, d. h. proportional der durch den Elektrolyten hindurchgegangenen Elektrizitätsmenge.

Die durch denselben galvanischen Strom zersetzten Mengen verschiedener Elektrolyte sind einander chemisch äquivalent, d. h. sie verhalten sich zu einander, wie die Gewichtsverhältniszahlen, nach denen sie chemische Verbindungen mit einander eingehen.

Beide Sätze lassen sich in folgenden zusammenfassen: Die durch den galvanischen Strom zersetzte oder aufgelöste oder niedergeschlagene Menge einer Substanz ist gleich dem Produkte aus der Stärke, aus der Zeitdauer des Stroms und aus einer bestimmten, von der Natur der Substanz abhängigen Größe, welche elektrochemisches Äquivalent der Substanz genannt wird.

Das elektrochemische Äquivalent einer Substanz ist die von der Stromeinheit in der Zeiteinheit zersetzte Menge dieser Substanz und kann in Gramm ausgedrückt werden, wenn die Stromeinheit in absolutem Maße gemessen ist. Ist das elektrochemische Äquivalent einer Substanz durch den Versuch bestimmt, so lassen sich daraus die elektrochemischen Äquivalente der verschiedenen Substanzen mittels ihrer Äquivalentgewichte berechnen.



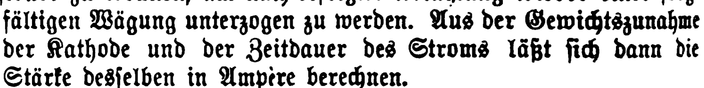
732. Silbervoltameter.

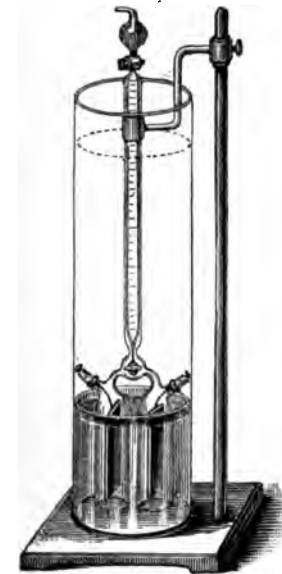
Da die von einem galvanischen Strom in einer bestimmten Zeit zersetzte oder niedergeschlagene Menge eines Elektrolyten der Intensität des Stroms proportional ist, so kann diese Menge als Maß für die Intensität des galvanischen Stroms benutzt werden. Man nennt die Apparate, welche zur Messung der Zersetzungsmengen von Elektrolyten dienen, Voltameter.

Die von einem Strome in einer bestimmten Zeit aus einer Silberlösung elektrolytisch niedergeschlagene Silbermenge ist von verschiedenen Forschern mit großer Genauigkeit bestimmt worden, so daß man dieselbe zur Definition der praktischen Stromeinheit, des Ampère, benutzt hat: Ein konstanter Strom hat die Stärke von 1 Ampère, wenn er beim Durchgang durch eine wässerige Lösung von salpetersaurem Silber 0,001118 Gramm Silber in einer Sekunde niederschlägt. Da nach dem zweiten Faradayschen Gesetze der Elektrolyse die durch denselben Strom zersetzten Mengen der Substanzen ihren chemischen Äquivalentgewichten proportinal sind, so ergibt sich, unter Zugrundelegung dieses Wertes für Silber, daß ein Strom von der Stärke 1 Ampère in der Sekunde 0,000328 g Kupfer niederschlägt, oder 0,0000933 g Wasser zersetzt oder endlich 0,174 cbcm Knallgas bei 0° C. und 76 cm Druck entwickelt.

Das Silbervoltameter. Eine zweckmäßige Form des Silbervoltameters ist durch **Abb. 732** dargestellt. Es besteht aus einer Platinschale P als Kathode, welche mit einer wässerigen (15—30%) Lösung von reinem salpetersauren Silber gefüllt wird. Die Platinschale steht in metallischer Verbindung mit der einen der beiden auf dem Stative

befindlichen Klemmschrauben k_2, zu welcher der negative Pol der Kette geführt wird. Die Anode, welche längs einer mit der anderen Klemmschraube k_1 verbundenen Metallsäule verschoben werden kann, besteht aus einem Konus oder Stabe oder einer horizontalen Spirale aus chemisch reinem Silber, welche, um das Herabfallen von Silberteilchen zu verhüten, mit Musselin oder Fließpapier umhüllt, oder von einer kleinen Glasschale umgeben ist. Vor dem Versuche ist die Platinschale zuerst mit Salpetersäure und hierauf mit destilliertem Wasser zu waschen, dann im Luftbade zu erwärmen und im Exsikkator zu trocknen und abzukühlen. Danach wird sie einer genauen Wägung unterzogen. Alsdann wird das Voltameter mit der Silbernitratlösung gefüllt und die Kathode mit dem negativen, die Anode mit dem positiven Pol einer konstanten Batterie verbunden und die Zeitdauer, während welcher der Strom durch das Voltameter hindurchgeht und welche etwa eine halbe Stunde betragen mag, mittels einer guten Uhr gemessen. Nach Öffnung des Stroms ist die Kathode mit heißem destillierten Wasser abzuspülen, in einem Luftbade zu trocknen, um nach erfolgter Abkühlung wieder einer sorgfältigen Wägung unterzogen zu werden. Aus der Gewichtszunahme der Kathode und der Zeitdauer des Stroms läßt sich dann die Stärke desselben in Ampère berechnen.





733. Wasservoltameter.

Bei dem Kupfervoltameter wird als Elektrolyt eine konzentrierte, wässerige Lösung von reinem schwefelsauren Kupfer (etwa ein Gewichtsteil des krystallisierten Salzes auf drei Gewichtsteile destillierten Wassers), als Anode eine Platte aus reinem Kupfer, als Kathode eine solche aus Platin oder ebenfalls aus reinem Kupfer angewandt.

Beim Wasservoltameter dient als Elektrolyt angesäuertes Wasser, und zwar reine verdünnte (10—20 prozentige) Schwefelsäure, als Elektroden dienen reine Platinbleche, welche mittels Platindrähten in das Meßrohr eingeschmolzen sind (Abb. 733). Entweder bestimmt man das Gewicht der zersetzten Wassermenge durch Wägung vor und nach dem Versuche, nachdem man die Zersetzungsprodukte des Wassers während der Elektrolyse in die Atmosphäre hat entweichen lassen, oder man bestimmt das Volumen des während der Elektrolyse entwickelten Knallgases (Knallgasvoltameter), indem gleichzeitig die Temperatur und der Druck, unter welchem das Gas aufgefangen wird, gemessen wird. Zur Wasserzersetzung ist mindestens die Anwendung von 3 Daniellschen Elementen erforderlich, da die Polarisation Wasserstoff-Sauerstoff auf Platin fast 3 Volt beträgt.

Polarisation. Bei dem auf S. 554 angeführten Versuche, bei welchem ein galvanischer Strom mittels Platinelektroden in angesäuertes Wasser geleitet wurde, wird von der Anode der elektronegative Bestandteil des Wassers (der Sauerstoff) und von der Kathode der elektropositive Bestandteil (der Wasserstoff) angezogen; die beiden Platinelektroden werden infolgedessen polarisiert, d. h. sie werden mit dünnen Gasschichten von Sauerstoff, resp. Wasserstoff überzogen, welche, wenn man den galvanischen Strom unterbricht und die Platinelektroden durch einen Draht verbindet, einen neuen galvanischen Strom hervorrufen, welcher Polarisationsstrom heißt. Die Wasserstoffschicht entspricht einem positiven, die Sauerstoffschicht einem negativen Pol, die Richtung des Polarisationsstroms ist daher entgegengesetzt derjenigen des ursprünglichen galvanischen Stroms. Die Dauer des Polarisationsstroms ist aber nur eine kurze, er zersetzt nämlich selbst das Wasser und scheidet an der mit Wasserstoff überzogenen Elektrode Sauerstoff und an der mit Sauerstoff überzogenen Wasserstoff ab, wodurch die Gasschichten neutralisiert werden. Durch diesen Polarisationsstrom wird der Batteriestrom geschwächt; auch in der Batterie selbst treten Polarisationsströme auf, welche infolge ihrer der Richtung des Hauptstroms entgegengesetzten Richtung denselben außerordentlich schwächen. Ein Element mit einer einzigen Flüssigkeit kann infolge der Polarisation seiner Metallplatten keine konstante elektro-

motorische Kraft besitzen. Um die Polarisation möglichst zu beseitigen und in ihrer Wirkung möglichst konstante Elemente zu erhalten, muß man zwei Flüssigkeiten anwenden.

Chemische Prozesse in den Elementen. Beim Daniellschen Element und bei seinen Modifikationen wird der galvanische Strom durch die Bildung von Zinksulphat und den Verbrauch von Kupfersulphat erzeugt. Der Zinkcylinder wird von der Schwefelsäure aufgelöst und Zinksulphat gebildet, während sich das Kupfer der Kupfersulphatlösung auf der Kupferplatte metallisch niederschlägt und somit deren Oberfläche vergrößert. Das Element bleibt konstant, solange die Kupfersulphatlösung hinreichend gesättigt ist; zu diesem Zweck legt man in die gesättigte Lösung noch Kupfersulphatkrystalle hinein. Beim Groveschen und beim Bunsenschen Element dient die konzentrierte Salpetersäure als Depolarisator. Der bei der Zersetzung des Wassers freiwerdende Wasserstoff reduziert die Salpetersäure zu Stickstoffdioxyd (Untersalpetersäure), welches mit Wasser in Salpetersäure und Stickstoffoxyd zerfällt. Letzteres löst sich zum Teil in der Salpetersäure unter Bildung von Stickstoffdioxyd, teils entweicht es und oxydiert an der Luft zu Stickstoffdioxyd.

Sekundäre Elemente oder Akkumulatoren. Während man mit der Konstruktion der konstanten Elemente bestrebt war, die Wirkungen der Polarisation möglichst zu beseitigen, wird andererseits die Polarisation der Metallplatten in neuerer Zeit



784. Batterie von Akkumulatoren.

mit großem Vorteil gerade zur Stromlieferung, zur Konstruktion der sogenannten sekundären Elemente oder Akkumulatoren benutzt, welche in der Elektrotechnik ausgedehnte Anwendung zu den verschiedensten Zwecken finden.

Von einer ausführlichen Beschreibung der Herstellung und Wirkungsweise der mannigfachen Konstruktionsformen der Akkumulatoren muß an dieser Stelle abgesehen werden; hier soll nur das zum allgemeinen Verständnis Erforderliche in Kürze Aufnahme finden:

Stellt man zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure und sendet den Strom mindestens zweier Bunsenschen Elemente hindurch, so wird die positive, d. h. die mit dem Kohlenpol der Bunsenelemente verbundene Bleiplatte zu Bleisuperoxyd oxydiert, die negative bedeckt sich mit Wasserstoff, resp. wird, wenn sie oxydiert war, zu reinem Blei reduziert. Unterbricht man den primären Strom, so bilden die beiden Bleiplatten die Elektroden eines sekundären Elements, deren positiver Pol derjenige ist, welcher mit dem positiven Pol der primären Elemente verbunden war. Während der Stromabgabe geht in dem sekundären Element der umgekehrte Prozeß vor sich. Die positive Platte wird reduziert, die negative Platte oxydiert. Der Strom dauert mit abnehmender Intensität so lange, bis der Anfangszustand der Bleiplatten wieder erreicht ist. Man setzt jedoch die Entladung nicht bis zu diesem Zeitpunkte fort, sondern unterbricht dieselbe im geeigneten Augenblicke und ladet von neuem. Durch fortgesetztes Laden und Entladen werden die

Bleiplatten in geeigneter Weise formiert, d. h. zur Aufnahme des Bleisuperoxyds tauglicher gemacht. Mit der Formierung nimmt die Dauer des sekundären Stroms zu. Hierin besteht im wesentlichen das Verfahren von Planté, welcher zuerst im Jahre 1860 in größerem Maßstabe sekundäre Elemente mittels Bleiplatten hergestellt hat, während die Fähigkeit des Bleis, einen kräftigen Polarisationsstrom zu erzeugen, von Sinsteden bereits im Jahre 1854 erkannt wurde. Faure bedeckte, um die Formierung zu beschleunigen, die Bleiplatten mit einer Schicht Mennige. Bei diesem, seither allgemein angewandten Verfahren bildet sich an der positiven Platte eine größere Menge Superoxyd, an der negativen Bleischwamm. Die verschiedenen Typen von Akkumulatoren sind nur durch die Form und Herstellung der Platten, der Träger der aktiven Masse, verschieden. Die Träger werden teils aus massiven Platten, welche mit Rinnen oder Vorsprüngen versehen sind, teils gitterförmig hergestellt, und in diese Gitter wird die aktive Masse, d. h. die zu Superoxyd, resp. Schwamm umzubildende Masse hineingepreßt. Hierdurch erhalten die Platten eine größere Fähigkeit, Strom zu binden, und größere Widerstandsfähigkeit gegen die Zerstörung durch den Strom.



735. Moritz Hermann von Jakobi, Erfinder der Galvanoplastik.

In Abb. 734 ist die Aufstellung einer kleinen Batterie von Akkumulatoren, wie sie die Akkumulatoren-Aktiengesellschaft in Hagen (Westfalen) ausführt, dargestellt.

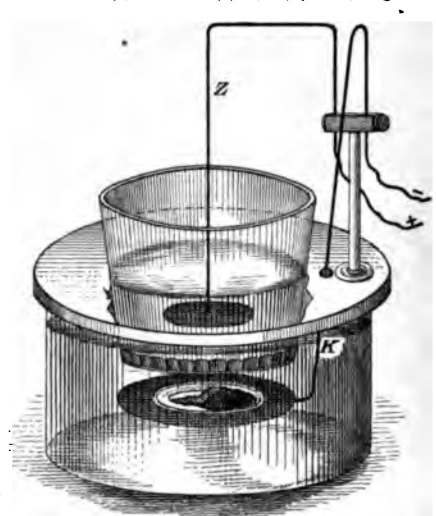
Die chemischen Wirkungen des galvanischen Stroms, von denen hier nur einige wichtige Beispiele angeführt wurden, sind so mannigfacher Art, und ihr Studium hat einen solchen Umfang angenommen, daß es sich zu einer besonderen Wissenschaft ausgebildet hat, der Elektrochemie, deren Ergebnisse in neuerer Zeit nicht nur in wissenschaftlicher Hinsicht eine wesentliche Erweiterung und Umgestaltung der elektrischen Theorieen gezeitigt, sondern auch praktisch einen der wichtigsten Zweige der Elektrotechnik und der Industrie begründet haben.

Die Galvanisierung, die Galvanoplastik oder Galvanotypie sind unter anderen wichtige Anwendungen der Elektrochemie, bei denen Gold-, Silber-, Kupfer-, Nickellösungen durch den galvanischen Strom zersetzt werden, und die ausgeschiedenen Metalle an den mit ihnen zu überziehenden Körpern fest anhaften. Beobachtungen an der Kupferplatte des Daniellschen Elements haben die Natur zu einer merkwürdigen Künstlerin heranbilden gelehrt, indem jene Kupferniederschläge zusammenhängend, fest und doch so zart hervorgerufen werden können, daß sie alle Unebenheiten, alle Erhöhungen und Vertiefungen der Polplatte auf das genaueste abbilden. Der Entdecker der Grunderscheinung ist Wach, welcher 1830 bei der Konstruktion einer konstanten Kette die Ablagerung von Kupfer bemerkte.

Wahrscheinlich treibt die Natur den galvanoplastischen Prozeß seit Millionen von Jahren schon in größter Ausdehnung; wenigstens gibt es für die Entstehung der Lagerstätten von gediegenen Metallen, die sich hier und da, z. B. an den Oberen Seen in Nordamerika finden, sowie für das Vorkommen von gediegenem Kupfer innerhalb der Schichten sedimentärer Gesteine, keine einfachere Erklärung als die Annahme, daß der galvanische Strom, der im Laboratorium des Chemikers das Kupfer aus seinen Lösungen zu scheiden vermag, auch in der großen Werkstätte der Schöpfung seine Thätigkeit immerdar geübt hat.

Zwei Männer sind es, H. Jakobi in Petersburg und Spencer in Liverpool, welche, wie es scheint, gleichzeitig und unabhängig von einander den Gedanken, mit dem am negativen Pol sich niederschlagenden Kupfer bestimmte Formen zu überziehen, ausführten. Im Jahre 1838 gelang es Jakobi, seine ersten galvanoplastischen Produkte aufzuweisen, für welche er von der russischen Regierung eine Belohnung von 25 000 Rubeln erhielt.

Ein galvanoplastischer Apparat besteht im wesentlichen aus einer galvanischen Batterie z. B. von Zink in verdünnter Schwefelsäure und Kupfer in Kupfersulphatlösung und einer porösen Scheidewand beider Flüssigkeiten (Abb. 736).



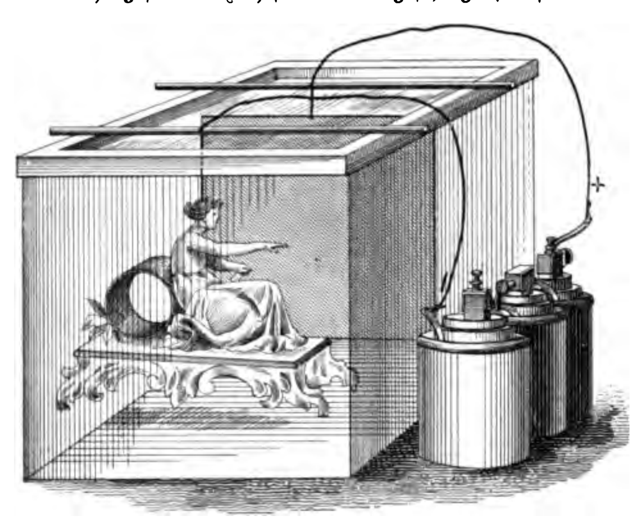
736. Einfacher galvanoplastischer Apparat.

Der Gegenstand, von welchem ein Abdruck genommen werden soll, befindet sich auf der Kupferplatte K. Das sich abscheidende Kupfer schlägt sich auf allen leitenden Punkten seiner Oberfläche nieder. Münzen oder Medaillen geben ein vertieftes Abbild, von einer gravierten Platte wird dagegen der metallische Überzug eine erhabene Kopie zeigen, wie das Siegel eines Petschafts. Eine geätzte oder radierte Kupferplatte, wie sie für den Abdruck von Kupferstichen hergestellt wird, prägt der Metallablagerung die zartesten Linien erhaben ein, und zwar so genau, daß, wenn man diese Ablagerung wieder in den Apparat bringt, man einen neuen Niederschlag entstehen lassen kann, der alle jene feinen Züge wieder vertieft zeigt und eine so genaue Kopie der ersten Platte ist, daß man von ihr Abdrücke erhalten kann, die von denen der Originalplatte nicht zu unterscheiden sind. In der That wird dieses Verfahren vielfach angewendet, um von einer Kupferplatte, die für sich allein nur etwa 800 gute Abdrücke liefern würde, nicht direkt zu drucken, sondern auf die angegebene Weise sich erst ein negatives Abbild und von diesem sodann beliebig viele mit der Originalplatte auf das schärfste übereinstimmende Druckplatten zu verschaffen. Ausgedehnte Anwendung von diesem Mittel, wertvolle gestochene Platten zu schonen, macht man besonders in den Anstalten für Herstellung von Wertpapieren; des gleichen Verfahrens bedient man sich, um Holzstöcke u. dgl. galvanoplastisch zu vervielfältigen, anstatt Klischees von ihnen anzufertigen. Mit welcher Treue galvanoplastische Nachbildungen dem Originale entsprechen, wie mikroskopisch fein die Teilchen des ausgeschiedenen Kupfers sich in die Modellierungen der Unterlage hineinpressen, das erkennt man daraus, daß es bei gut geleitetem, langsam vorschreitendem Prozesse gelingt, von Daguerreotypplatten, auf denen das Bild durch die verschieden dichte Anhäufung feinster Quecksilberkügelchen hervorgerufen wird, vollständig treue und scharfe Abbilder zu erhalten.

Für viele Zwecke ist es vorteilhaft, das Niederschlagsgefäß von der Batterie zu trennen und in die zu zersetzende Metalllösung nur die beiden Poldrähte hineinzuleiten. Seit Ende der 70er Jahre werden zur Stromerzeugung für die galvanoplastischen Niederschläge vorzugsweise Akkumulatoren angewandt.

Die Form am negativen Pol, welche mit Kupfer überzogen werden soll, braucht nicht von Metall zu sein; es genügt, daß ihre Oberfläche leitend gemacht wird. Murray hat im Jahre 1840 zuerst auf die Möglichkeit hingewiesen, nichtmetallische Formen zu galvanoplastischen Niederschlägen zu benutzen. Als ein ausgezeichnetes Abformungsmittel hat sich Guttapercha erwiesen. Sie nimmt, wenn sie in heißem Wasser erweicht und so auf das Original gedrückt wird, die feinste Modellierung desselben auf das vollkommenste an. Um die Oberflächen der Formen leitend zu machen, reibt man sie mit fein geschlemmtem Graphit oder mit Metallbronzen ein, oder bestreicht sie mit einer Silberlösung und setzt sie den Dämpfen von Schwefeläther aus, in welchem etwas Phosphor aufgelöst ist; es bildet sich hierbei ein feines, sehr gut leitendes Häutchen von Phosphorsilber u. s. w. Diejenigen Punkte, an denen sich kein Kupfer absetzen soll, bestreicht man mit einem Firnis oder mit Wachs.

Zahllose Werke der Bildhauerkunst sind auf galvanoplastischem Wege vervielfältigt worden; in vielen Fällen hat der Künstler sein Werk gleich in einer über dem ausgeführten Modell hergestellten Hohlform niedergeschlagen, anstatt es in Stein oder in Erzguß herzustellen. Als Vervielfältigungsmittel ist die Galvanoplastik gleich wertvoll dem Kupferstecher, dem Holzschneider u. s. w., wie dem Schriftgießer, indem sie ihn in den Stand setzt, ohne den Stempel in Stahl zu schneiden, von jedem gegossenen Buchstaben eine kupferne Matritze zu gewinnen und ihn in beliebiger Anzahl aufs neue zu gießen.



787. Apparat zur galvanischen Versilberung.

Für die Industrie ist durch die Erfindung der Galvanoplastik ein ausgedehntes und weitverzweigtes Arbeitsfeld geschaffen. Es sind große Etablissements entstanden, in denen alle galvanoplastischen Arbeiten ausgeführt werden, andere wieder, in denen nur einzelne Zweige, z. B. die Abformung von Kupferstichplatten, Holzschnitten u. s. w. betrieben werden.

Paris hat sehr bedeutende solcher Ateliers aufzuweisen, und eine der großartigsten galvanoplastischen Unternehmungen dürfte wohl die naturgetreue Nachbildung eines der bedeutsamsten Werke alter Bildhauerkunst, der aus 33 Marmorblöcken zusammengesetzten, 40 m hohen, mit Tausenden von Figuren gezierten Trajanssäule in Rom sein, welche Napoleon von dem Etablissement von Oudry in Auteuil bei Paris hat ausführen lassen.

Galvanisierung. Bei dem rein galvanoplastischen Verfahren kommt es darauf an, aus gegebenen Formen neue, übereinstimmende, selbständige Formen aus Metall, z. B. aus Kupfer zu gewinnen. Bei der Galvanisierung werden Metalle mit anderen Metallen, insbesondere unedle Metalle mit edlen überzogen.

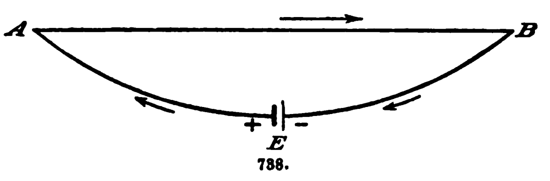
Die Versuchsanordnung zum Vergolden, Versilbern u. s. w. unterscheidet sich nicht wesentlich von der beschriebenen; die Batterie hat eine gesonderte Aufstellung. Das Metall, welches vergoldet, versilbert u. s. w. werden soll, wird in einem Goldbade, Silberbade (Lösungen von Cyankalium) zur Kathode gemacht, also mit dem negativen Pol der Batterie verbunden, während ihnen als Anode ein Goldstück, Silberstück u. s. f. gegenübergestellt wird.

Die galvanische Versilberung und Vergoldung hat eine sehr ausgedehnte Anwendung auf die verschiedensten Gebrauchsgegenstände gefunden und ist von großer wirtschaftlicher Wichtigkeit nicht nur insofern, als durch sie in Vergleich zu der Feuervergoldung große

Quantitäten edler Metalle erspart werden, sondern auch die bei letzterer sich entwickelnden schädlichen Quecksilberdämpfe vermieden werden. In Ruhla (Thüringen) werden mit drei Mark 4—600 Dutzend Pfeifenbeschläge versilbert, und mit 5 Gran Gold (1,50 Mark wert) 12 Dutzend Knöpfe von 2,5 cm Durchmesser vergoldet; bei geringeren Sorten beträgt die Dicke des Goldüberzugs nicht 0,0001 mm. Um für solche Zwecke die richtige Menge Silber oder Gold aus der Lösung abzuscheiden und den verlangten Grad der Veredelung zwar hervorzurufen, aber auch nicht überflüssiger Weise die kostbaren Metalle zu verwenden, hat man besondere Wagen konstruiert, welche den Fortgang des Prozesses selbstthätig unterbrechen, sobald die beabsichtigte Menge Metall abgelagert ist. Sie sind so eingerichtet, daß die zu galvanisierenden Gegenstände an das eine Ende eines zweiarmigen Wagebalkens angehängt werden, dessen anderes Ende ein der abzuscheidenden Metallmenge gleiches Gewicht trägt. Ist die Niederschlagsmenge größer geworden, als dieses Gewicht, so senkt sich der Wagebalken und unterbricht den Strom, und also auch die Gold- und Silberausscheidung.

Damit der Gold- oder Silberüberzug die ganze Oberfläche gleichförmig bedecke, muß der Gegenstand sorgfältig gereinigt und frei von allem Fett sein.

Umfangreiche Vergoldungen auf galvanischem Wege wurden unter anderm vom Herzog Max von **Leuchtenberg** in der russischen galvanoplastischen Anstalt zu Reval vorgenommen. Es handelte sich hierbei um die Vergoldung der für die Säulen der Isaakskirche zu Petersburg bestimmten, meterhohen, aus Bronze gegossenen Füße und Kapitäle, welche ein Gesamtgewicht von 28000 kg hatten, für welche Niederschlagskästen nötig waren, von denen jeder 5700 l Goldflüssigkeit enthalten sollte. Hierzu wurden oft 10—15 kg Gold an einem Tage in konzentrierter Cyankalilösung aufgelöst und in den drei Jahren, die diese Arbeiten dauerten, mehr als 280 kg Gold verbraucht.



738.

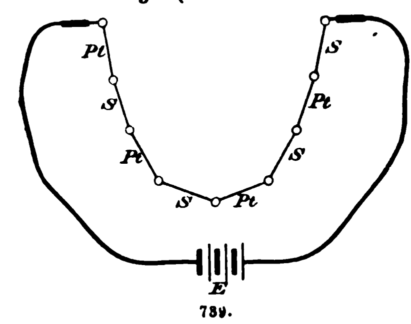
Um weit größere Edelmetallmengen handelt es sich aber noch bei der galvanischen Versilberung in Werkstätten wie der von **Christoffle** und Co. in Paris, St. Denis und Karlsruhe, oder in der von **Elkington** in London, in denen die Massenerzeugung von versilberten Tischgeräten, u. s. w. betrieben wird. Näheres über galvanische Vergoldung, Versilberung, Platinisierung, Vernickelung, Verzinnung u. s. w. findet man in dem dritten Bande dieses Werkes, welcher der praktischen Anwendung der Elektrizität gewidmet ist. Dort finden auch andere, in der neuesten Zeit stark entwickelte Zweige der praktischen Elektrochemie, die elektrolytische Metallgewinnung und Reinigung, die Darstellung von Magnesium und besonders von Aluminium aus geschmolzenen Magnesium- oder Aluminiumverbindungen, ferner die Anwendung der Elektrochemie zum Bleichen, zum Färben, zum Reinigen von Gewässern u. s. w. ihre Behandlung.

Wärme- und Lichtwirkungen des galvanischen Stroms.

In dem in der Richtung von A nach B (Abb. 738) von einem Strom durchflossenen Leiter findet, wie wir gesehen haben, in den Punkten A und B eine Potentialdifferenz statt, infolgederen Elektrizität von A nach B strömt. Indem die Elektrizität den Leiter durchströmt, hat sie seinen Widerstand zu überwinden, also eine Arbeit zu leisten, welche nach dem Prinzip von der Erhaltung der Energie in irgend einer Form zu Tage treten muß. In der That tritt die vom Strom geleistete Arbeit in Form einer Erwärmung des Leiters auf, welche um so größer ist, je größer sein Widerstand ist. Wie die von einem frei herabfallenden schweren Körper geleistete Arbeit gemessen wird durch das Produkt aus seinem Gewicht und der Fallhöhe, so wird die von einem galvanischen Strom in einer bestimmten Zeit t durch die Fortbewegung der Elektrizität geleistete Arbeit A (Stromarbeit) dargestellt durch das Produkt aus der während dieser Zeit übergeführten Elektrizitätsmenge Q und der Potentialdifferenz E

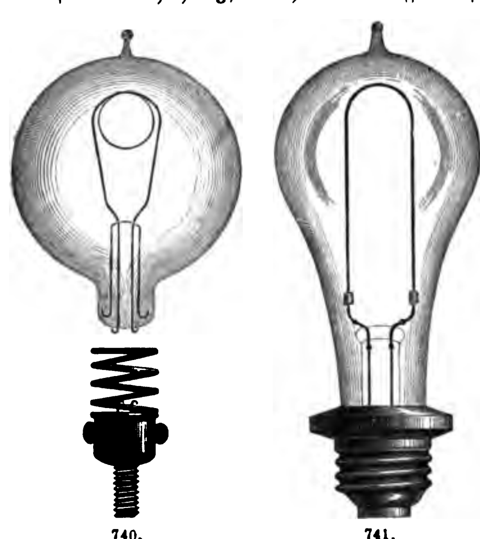
$$A = Q E,$$

und da die Elektrizitätsmenge Q gleich ist dem Produkte i t aus der Stromintensität i und der Zeit t, und ferner nach dem Ohmschen Gesetze E gleich dem Produkte i w aus Stromintensität i und Widerstand w ist, so ist die Stromarbeit $A = i^2 w t$. Da nun eine Arbeit, wie wir in der Wärmelehre gesehen haben, stets äquivalent ist einer bestimmten Wärmemenge (einer Grammkalorie entsprechen im Mittel 0,425 Kilogrammmeter), so ergibt sich, daß die in dem Leiter durch den Strom erzeugte Wärme proportional dem Produkte aus dem Quadrat der Stromintensität, aus dem Widerstand des Leiters und aus der Zeitdauer des Stroms ist.



739.

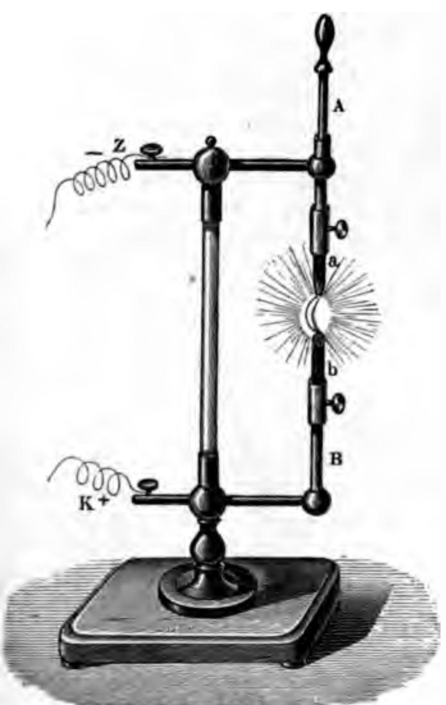
Auch Flüssigkeiten und die Batterie selbst werden nach demselben Gesetze durch den galvanischen Strom erwärmt, indessen setzt sich dann nicht die gesamte innere Arbeit des Stroms in Wärme um, sondern nur ein Teil derselben, während der andere Teil für chemische Prozesse zur Zersetzung verwendet wird. Dieser wichtige, theoretisch von William Thomson gefundene Satz ist experimentell bestätigt worden von Lenz einer- und Joule andererseits und heißt das Joule-Lenzsche Gesetz der Wärmewirkung des Stroms. Joule leitete Ströme, deren Intensität er messen konnte, durch Drähte, welche sich in einem Wasserkalorimeter befanden, und bestimmte die Stromwärme aus der Temperaturerhöhung, welche das Wasser infolge des Stromdurchgangs erfuhr. Bei Anwendung eines und desselben Drahts ergaben sich die in einer bestimmten Zeit entwickelten Stromwärmen proportional dem Quadrat der Stromintensität, bei Anwendung verschiedener Drähte bei derselben Stromstärke proportional dem Widerstand. Dicke Drähte werden also durch denselben Strom weniger erwärmt, als dünne aus demselben Material. Wir haben früher gesehen, daß der spezifische Widerstand des Platins bedeutend größer ist, als der des Silbers. Leitet man also einen Strom von passender Stärke durch eine abwechselnde Reihe von hinter einander geschalteten, gleich langen und gleich dicken Platin- und Silberdrähten (Abb. 739), so glühen alle Platindrähte, während die Silberdrähte dunkel bleiben.


740. 741.
740. u. 741. Glühlampen nach Swan und Edison.

Von der Wirkung des Stroms, Drähte zum Glühen zu bringen, wird in der mannigfaltigsten Weise in der Praxis Gebrauch gemacht, in der Sprengtechnik, um die Explosivstoffe zur Entzündung zu bringen, in der Medizin zu galvanokaustischen Zwecken, im Haushalte für Heizzwecke, am ausgedehntesten aber in der neueren Zeit bei der Beleuchtung durch die elektrischen Glühlampen. Denn diese bestehen im Wesentlichen aus dünnen, eigentümlich präparierten Kohlenfäden (Abb. 740 u. 741), welche durch den Strom zum Glühen gebracht, und, damit sie nicht verbrennen und möglichst wenig Wärme durch Wärmeleitung verlieren, in Glasgefäße eingeschlossen werden, welche durch eine Quecksilberluftpumpe evakuiert sind.

Auf der Wärmewirkung des Stroms beruht auch das elektrische Bogenlicht, welches im Jahre 1821 der englische Physiker Sir Humphrey Davy beobachtete, als er die Pole seiner aus 2000 Elementen bestehenden galvanischen Batterie mit zwei Kohlenstäben in Verbindung brachte, deren Spitzen einander berührten (Abb. 742). Zunächst

gerieten diese infolge der ungeheuren Stromwärme ins Glühen. Als er dann die Kohlenspitzen von einander entfernte, ging der Strom von Kohle zu Kohle durch die glühende Luft und bildete ein intensives, glänzendes Licht, den sogenannten Davyschen Licht- oder Flammenbogen. Das Licht ist so intensiv, daß man es nur mit durch farbige Gläser geschütztem Auge betrachten kann. Der Flammenbogen selbst leuchtet nur mit verhältnismäßig schwachem, bläulichem Licht, dagegen glühen die Kohlenenden in hellster Weißglut, und zwar das positive, d. h. das mit dem positiven Pol der Batterie verbundene, intensiver als das negative. Dabei fliegen Kohlenpartikelchen von den Kohlenspitzen, besonders von der positiven ab und setzen sich an der gegenüberliegenden als kleine Kügelchen an (Abb. 743), und es bildet sich allmählich an der positiven Kohle eine kraterförmige Vertiefung, an der negativen eine Spitze. Um die Erscheinungen bequem zu beobachten, projiziert man den Lichtbogen mittels einer Projektionslinse auf einen weißen Schirm. Der Flammenbogen




742. Vorrichtung zur Erzeugung des elektrischen Lichtbogens.



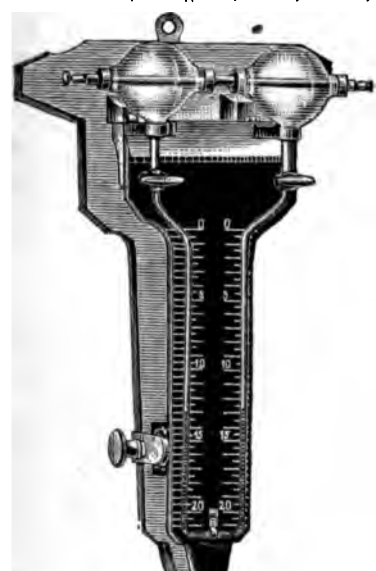
743. Die glühenden Kohlenspitzen des Lichtbogens.

liefert die höchste Temperatur, die wir erzeugen können; in ihm werden alle Körper mit Ausnahme des Kohlenstoffs zum Schmelzen und Verdampfen gebracht. Er wird beim elektrischen Löt- und Schweißverfahren benutzt, und in jüngster Zeit ist es Moisson in Paris und nach ihm dem Italiener Quirino Majorana gelungen, in einem auf dem Lichtbogen beruhenden, elektrischen Ofen unter Anwendung eines großen Drucks künstliche Diamanten, allerdings nur von winziger Größe, aus Kohlenstoff darzustellen.

Da die Kohlen allmählich im Lichtbogen abbrennen, und zwar die positive nahezu doppelt so schnell als die negative, müssen die elektrischen Bogenlampen mit mechanischen Vorrichtungen versehen sein, welche auf automatischem Wege die Kohlen im Verhältnis ihres Abbrennens einander wieder nähern, resp. einen konstanten Abstand derselben regulieren. Ausführlicheres hierüber findet man im 3. Band dieses Werks.

Peltiersches Phänomen. Besteht ein stromdurchflossener Leiter aus zwei an einander gelöteten, heterogenen Metallen, z. B. aus Wismut und Antimon, so tritt, wie zuerst Peltier im Jahre 1834 beobachtet hat, abgesehen von der Jouleschen Erwärmung, die

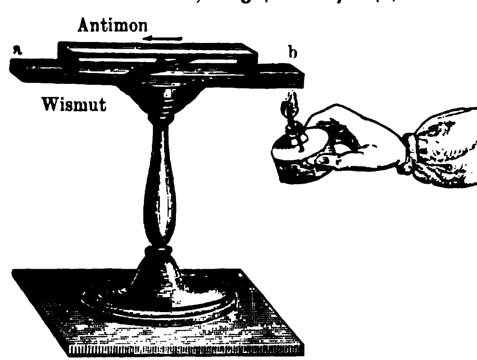
proportional mit dem Quadrate der Stromintensität und daher von der Stromrichtung unabhängig ist, an der Lötstelle eine Erwärmung oder eine Abkühlung auf, je nachdem der Strom vom Antimon zum Wismut oder in entgegengesetzter Richtung fließt, welche proportional der Stromstärke ist und Peltierscher Effekt genannt wird. Zum Nachweis dieses Effekts, welcher leicht durch die Joulesche Wärme verdeckt werden kann, wählt man zweckmäßig möglichst dicke Drähte, um deren Widerstand und also auch die Joulesche Wärme möglichst klein zu machen. Abb. 744 stellt einen zur Demonstration des Peltierschen Effekts geeigneten Apparat dar. An ein Antimonstäbchen sind beiderseits Wismutstäbchen angelötet und die beiden Lötstellen in die Kugeln eines Luftthermometers eingeschlossen, so daß die Joulesche Wärme in den beiden Kugeln in gleicher Weise, der Peltiersche Effekt aber in entgegengesetzter Weise zur Wirkung kommt. Beim Stromwechsel gibt der Flüssigkeitszeiger sofort einen Ausschlag nach entgegengesetzter Richtung.



744. Apparat zur Demonstration des Peltierschen Effekts.

Lenz hat die Peltiersche Abkühlung sehr schön nachgewiesen, indem er in die Lötstelle eines in schmelzenden Schnee gebetteten Wismut-Antimonstabs ein Loch bohrte, dieses mit Wasser füllte und, indem er den positiven Strom einer Kette durch den Stab vom Wismut zum Antimon leitete, das Wasser nicht nur zum Gefrieren brachte, sondern das so gebildete Eis bis etwa — 3° C. abkühlte.

Der Thermostrom. Wenn in einem aus zwei heterogenen Metallen gebildeten, in sich geschlossenen Kreise die eine Stelle, an welcher die Metalle einander berühren, eine höhere Temperatur besitzt, als die andere, so tritt, wie zuerst Seebeck im Jahre 1821 entdeckt hat, eine elektromotorische Kraft auf, welche in dem Schließungskreise einen elektrischen Strom von bestimmter Richtung erzeugt, dessen Intensität innerhalb gewisser Temperaturgrenzen proportional ist der Differenz der an den beiden Berührungsstellen herrschenden Temperaturen. Sie kann durch die Größe der Ablenkung einer Magnetnadel gemessen werden. Man nennt derartige elektrische Ströme, welche entstehen, wenn zwischen den verschiedenen Teilen eines metallischen Schließungskreises Temperaturdifferenzen herrschen, thermoelektrische oder Thermoströme und eine aus zwei Metallen gebildete Kombination, welche einen Thermostrom zu liefern vermag, ein Thermoelement.



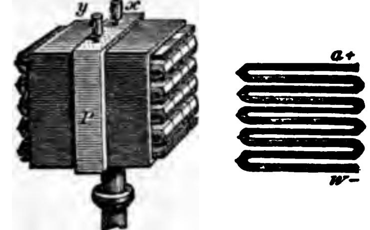
745. Thermoelement mit Magnetnadel.

Peltiersches Phänomen und Thermostrom stehen in innigster Beziehung zu einander; sie liefern den Nachweis für die Umkehrbarkeit physikalischer Vorgänge.

Die Richtung des Thermostroms hängt von der Natur der das Thermoelement bildenden Metalle ab. Die Versuche über das gegenseitige thermoelektrische Verhalten der Metalle haben ergeben, daß dieselben sich derart in eine Reihe ordnen lassen, daß bei Erwärmung der Lötstelle zweier derselben der positive Strom von dem in der Reihe tiefer stehenden Metall zu dem in der Reihe höher stehenden fließt. Dasjenige der beiden Metalle, zu welchem durch die erwärmte Lötstelle der positive Strom geht, nennt man das thermoelektrisch positive. In einem aus Wismut und Antimon gebildeten Viereck (Abb. 745) würde z. B., wenn man die Lötstelle b erwärmt, während die Lötstelle a auf

konstanter Temperatur erhalten wird, der positive Strom in Richtung des Pfeils fließen; Wismut ist daher das thermoelektrisch negative, Antimon das thermoelektrisch positive Metall.

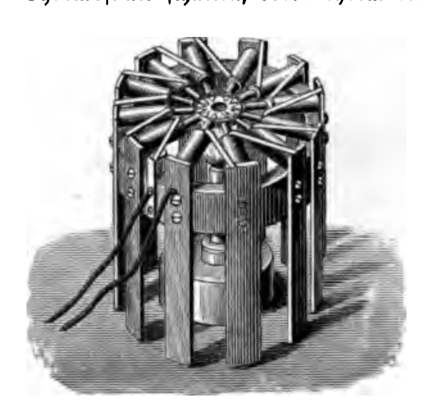
Von verschiedenen Forschern sind solche thermoelektrischen Spannungsreihen aufgestellt worden; sie weichen indessen zum Teil von einander ab, weil Änderungen in der Molekularstruktur oder geringe Beimengungen fremder Bestandteile von wesentlichem Einflusse auf ihre Stellung sind. Die Stellung der häufiger vorkommenden Metalle ist nach Versuchen von Hankel folgende: + Antimon, Eisen, Silber, Zink, Blei, Aluminium, Zinn, Kupfer, Gold, Platin, Quecksilber, Neusilber, Wismut —.

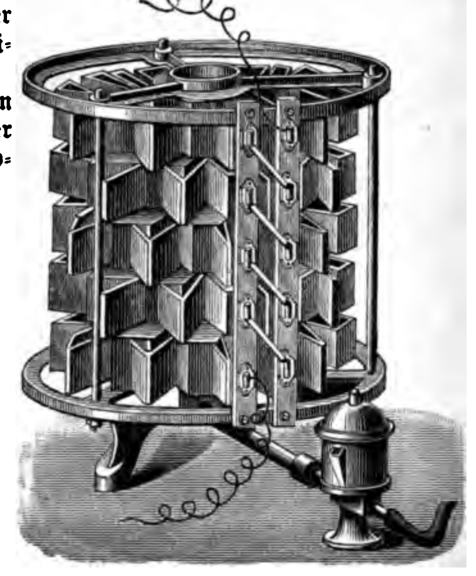


746. 747.
746 u. 747. Nobilische Thermosäule.

Die Größe der thermoelektromotorischen Kraft eines einfachen Thermoelements ist gegenüber derjenigen der galvanischen Elemente nur gering; z. B. ist die thermoelektromotorische Kraft eines Wismut-Antimonelements bei 100° C. Temperaturdifferenz der Lötstellen etwa gleich 0,01 der elektromotorischen Kraft eines Daniellschen Elements.

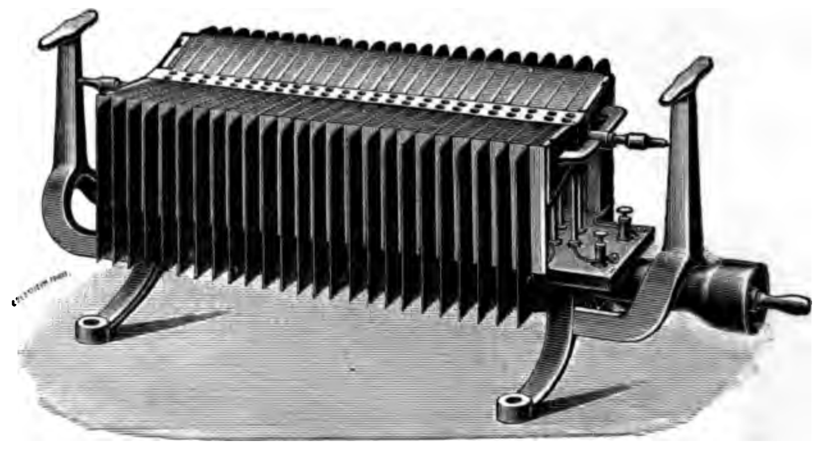
Man kann eine größere Anzahl von Thermoelementen hinter einander zu einer Thermosäule schalten, deren thermoelektromotorische Kraft gleich der Summe der elektromotorischen Kräfte aller einzelnen Thermoelemente ist. Zu diesem Zweck werden die das Thermoelement bildenden Metalle, z. B. Wismut- und Antimonstäbchen abwechselnd im Zickzack an einander gelötet und gut von einander isoliert in parallele Reihen derart angeordnet, daß sämtliche ungeradzahligen Lötstellen auf der einen und sämtliche geradzahligen Lötstellen auf der anderen Seite liegen. Abb. 746 und 747 stellen die bekannten Formen der Nobilischen Thermosäule dar, und zwar Abb. 747 eine lineare und Abb. 746 eine parallelepipedische Säule von quadratischem Querschnitt. Die beiden Endflächen sind mit Kienruß geschwärzt; das erste Wismut- und das letzte Antimonstäbchen stehen mit zwei Klemmschrauben x, y in metallischer Verbindung, von denen aus die Zuleitungsdrähte zu dem die Stromintensität messenden Galvanometer führen. Die Thermosäule wurde und wird hauptsächlich angewandt bei Versuchen über die erwärmenden Wirkungen der Strahlung; dabei wird die eine Seite auf konstanter Temperatur erhalten, die andere der Strahlung der Wärmequelle ausgesetzt. Die Anwendung von Thermoelementen eignet sich besonders für Untersuchungen, bei denen die Temperaturmessung auf kleine und auf schwer zugängliche Räume im Innern der Körper lokalisiert ist. Statt der früher üblichen Kombination Wismut-Antimon wendet man in neuerer Zeit


748. Sternförmige Thermosäule von Noë.


749. Clamondsche Thermosäule.

mehrfach eine Kombination von Wismut und einer Zink-Antimonlegierung an, welche etwa eine dreimal größere thermoelektromotorische Kraft liefert, und diese Legierung wird noch um das Doppelte übertroffen durch die allerdings schwierig herzustellende und sehr kostspielige Kombination Tellur-Wismut.

Mit Hilfe einer sehr empfindlichen Thermosäule aus Wismut und der Zink-Antimonlegierung hat Dr. Frölich Messungen der Sonnenwärme angestellt, deren Resultate sowohl für die Astronomie, wie für die Erkenntnis der meteorologischen Prozesse der Erde von Interesse sind. Bei den Versuchen, die von der Sonne ausgestrahlte Wärme zu messen und deren Änderungen zu verfolgen, handelt es sich hauptsächlich darum, den Einfluß der Atmosphäre zu eliminieren. Zu diesem Zweck werden die Strahlungswirkungen der Sonne unter verschiedenen Höhenwinkeln gemessen und aus den Messungen auf die Wärme geschlossen, welche die Sonne auf die Erdoberfläche senden würde, wenn keine Atmosphäre vorhanden wäre. Es ergab sich, daß die von der Sonne ausgestrahlte Wärme nicht konstant, sondern, wie man schon von vornherein aus den lebhaften und großartigen Veränderungen, Eruptionen, die in gewissen Zeiten auf der Sonnenoberfläche stattfinden, vermuten kann, erheblichen Veränderungen unterworfen ist, die mit der Ent-



750. Gülchers Thermosäule.

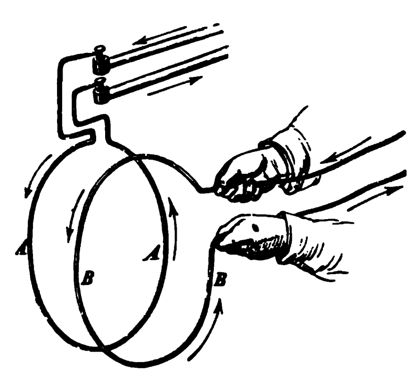
wickelung der Sonnenflecken im Zusammenhange zu stehen scheinen. Die ausgestrahlte Wärme scheint mit zunehmender Fleckenentwickelung abzunehmen. Für derartige wissenschaftliche Untersuchungen ist die Anwendung der Thermosäule von großer Wichtigkeit.[1]

Zur Messung sehr hoher Temperaturen (bis zu 1600° C.) dient in neuerer Zeit vielfach das Thermoelement von Le Chatelier, welches aus Platin und einer Platin-Rhodiumlegierung besteht.

Die Thermosäulen bieten ein bequemes Mittel zur Stromerzeugung, da in ihnen Wärme direkt in elektrische Energie umgesetzt wird. Abb. 748 stellt die mittels eines Bunsenschen Brenners zu erwärmende, sternförmige Thermosäule von Noë dar, welche aus radial gestellten, cylindrischen Stäbchen aus einer Zink-Antimonlegierung besteht, die gegen den Mittelpunkt mit kupfernen Heizstiften versehen sind. Letztere werden durch die Flamme direkt erwärmt und schützen den thermoelektrisch wirksamen Teil des Elements vor zu starker Erwärmung. Die Außenflächen der Elemente sind mit röhrenförmig gebogenen Kupferblechen versehen, welche als Träger und zugleich zur Fortleitung der Wärme dienen.

Bei der durch Abb. 749 dargestellten Clamondschen Thermosäule bestehen die Elemente aus verzinntem Eisen einerseits und aus einer Zink-Antimonlegierung andererseits. Sie sind zu einem Cylindermantel vereinigt, in dessen Innerem sich ein mit Öffnungen versehener Asbestcylinder befindet, welcher mittels eines Bunsenschen Brenners erhitzt wird; die inneren Flächen der Elemente sind auf diese Weise nicht der Flamme direkt ausgesetzt.

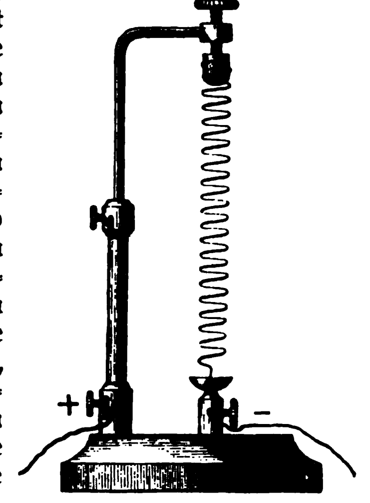
Die durch Abb. 750 dargestellte, gleichfalls durch Gas heizbare Gülchersche Thermosäule besteht aus 50 Elementen, die in zwei parallelen Reihen auf einer Schieferplatte montiert sind. Diese bildet den Abschluß des unter ihr befindlichen, mit einer Bunsenschen Einströmungsdüse versehenen Gasbehälters. Jedes Element besteht aus einem Nickelröhrchen als negativer Elektrode, welches gleichzeitig zur Gaszuführung für eine kleine Heizflamme dient. Mit dem oberen Ende Ende des Nickelröhrchens, in welches ein Einlochbrenner aus Speckstein eingeschraubt ist, ist ein rohrförmiges Verbindungsstahlstück fest verlötet, um welches die aus einer Antimonlegierung bestehende positive Elektrode von prismatischer Form herumgegossen ist. An den äußeren Enden der positiven Elektroden sind kupferne Kühlbleche angelötet, welche gleichzeitig zur Verbindung der durch Asbest von einander isolierten Elemente dienen. Die Gülcherschen Thermosäulen, deren Anwendung sich für verschiedene Zwecke, z. B. für galvanoplastische und elektrolytische Arbeiten, zum Laden von kleinen Akkumulatoren eignet, werden in verschiedenen Größen von der Firma Julius Pintsch in Berlin ausgeführt.



751. Anziehung gleichgerichteter paralleler Ströme.

Elektrodynamische Wirkungen des Stroms.

Wir haben (S. 547 f.) gesehen, daß ein stromdurchflossenes Solenoid sich wie ein Magnet verhält und von den Polen eines anderen Magnets angezogen oder abgestoßen wird. Die Annahme liegt daher nahe, daß auch zwei stromdurchflossene Solenoide auf einander anziehend und abstoßend wirken werden, wie zwei Magnete. In der That finden solche Einwirkungen nicht nur für Solenoide, sondern überhaupt für stromdurchflossene Leiter statt und zwar nach Gesetzen, welche von Ampère im Jahre 1820 experimentell und theoretisch begründet worden sind. Hängen wir einen quadratisch oder kreisförmig gebogenen Draht A A (Abb. 751) leicht beweglich auf, indem wir ihn in Spitzen endigen lassen, die in kleine Quecksilbernäpfchen tauchen, und leiten durch ihn einen Strom, so dreht er sich und stellt sich nach einigen pendelartigen Schwingungen so ein, daß seine Ebene senkrecht zum magnetischen Meridian steht. Nähern wir ihm nun einen zweiten kreisförmigen, stromdurchflossenen Draht BB, so zeigt sich eine Anziehung zwischen denjenigen Teilen beider Stromkreise, in denen der Strom die gleiche Richtung hat, eine Abstoßung dagegen zwischen den Teilen, in denen der Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Zwei parallele stromdurchflossene Leiter ziehen sich an oder stoßen sich ab, je nachdem die Ströme in beiden gleich oder entgegengesetzt gerichtet sind.



752. Anwendung des Ampèreschen Gesetzes.

Abb. 752 zeigt eine hübsche Anwendung des Ampèreschen Gesetzes. Das untere Ende der an dem metallenen Stative aufgehängten Spiralfeder taucht mittels einer Spitze in Quecksilber. Sendet man durch die Spirale einen Strom, so ziehen die einzelnen Windungen, da in ihnen allen der Strom in derselben Richtung fließt, einander an, die Spirale verkürzt sich infolgedessen, und der Strom wird, indem die Spitze aus dem Quecksilber herausgezogen wird, unterbrochen. Dadurch verlängert sich wieder die Spirale und schließt durch Eintauchen ihrer Spitze ins Quecksilber den Strom, und so wiederholt sich das Spiel von neuem, die stromdurchflossene Spirale gerät in longitudinale Schwingungen, durch die der Strom abwechselnd unter Funkenbildung geöffnet und geschlossen wird.

Ampère hat nicht nur die Wechselwirkung zweier paralleler, sondern auch diejenige beliebig gekreuzter, stromdurchflossener Leiter festgestellt. Zwei gekreuzte stromdurchflossene Leiter ziehen sich an, wenn in beiden die Ströme zu der Kreuzungsstelle hin- oder von derselben fortfließen; sie stoßen sich ab, wenn der Strom in dem einen Leiter zur Kreuzungsstelle hin- und in dem anderen von derselben fortfließt. Allgemein ergibt sich, daß zwei stromdurchflossene Leiter stets eine solche Wechselwirkung auf einander ausüben, daß sie sich parallel zu einander zu stellen streben und so, daß der Strom in ihnen nach derselben Richtung fließt.

Die Größe der elektrodynamischen Kraft, mit welcher die Stromkreise auf einander wirken, hängt ab von ihrer relativen Lage, von ihrer Entfernung und von der Stärke der sie durchfließenden Ströme; ceteris paribus ist sie proportional dem Produkte beider Stromstärken, also wenn beide Stromstärken einander gleich sind, proportional dem Quadrate der Stromintensität. Offenbar wird die elektrodynamische Wechselwirkung vergrößert werden, wenn statt einer Drahtwindung Drahtspiralen angewandt werden, deren einzelne Windungen von demselben Strom durchflossen werden. Eine stromdurchflossene Drahtspirale z. B. von n Windungen, welche innerhalb einer ebenfalls aus n Windungen bestehenden, festen, von demselben Strom durchflossenen Drahtspirale frei beweglich aufgehängt ist, wird eine n^2 mal größere Wirkung erfahren, als wenn beide Spiralen aus je einer Windung bestehen. Man nennt eine solche zur Messung der Wechselwirkung von Strömen dienende Vorrichtung ein Elektrodynamometer. Ampère hat sein elektrodynamisches Fundamentalgesetz nur für zwei freie Stromelemente, nicht für zwei geschlossene Ströme abgeleitet. Für geschlossene Ströme ist es erst durch Wilhelm Weber berechnet und durch genaue Messungen mittels des von ihm konstruierten Elektrodynamometers experimentell bestätigt worden. Wilh. Weber fand in Übereinstimmung mit dem Ampèreschen Fundamentalgesetz, daß die elektrodynamische Kraft, mit der zwei von demselben Strom durchflossene Drahtspiralen auf einander wirken, dem Quadrat der Stromintensität proportional ist.



753. Wilhelm Weber.

Abb. 754 stellt ein Elektrodynamometer für schwache Ströme von Siemens und Halske dar, und zwar ist, um das Innere sichtbar zu machen, die eine der beiden festen Rollen, ebenso wie der obere Teil der Suspensionsröhre, in der Zeichnung fortgelassen.

Die bewegliche innere Rolle R hat, ebenso wie der Hohlraum der äußeren Rolle, damit in jeder Lage der Abstand der inneren Windungen von den äußeren gleich und möglichst klein bleibt, die Form einer Kugel. Sie ist mit einem Spiegel versehen und an einem feinen Platindraht aufgehängt, durch welchen der Strom eintritt, während der Austritt des Stroms durch eine von dieser Rolle nach unten geführte Spiralfeder aus feinem Messing- oder Platindraht stattfindet. Bei den neueren Instrumenten sind statt

der einen vertikal nach unten führenden Spirale an dem von der inneren Rolle ausgehenden Stäbchen seitlich zwei gleiche Spiralen symmetrisch und in horizontaler Lage befestigt, durch welche der Strom austritt. Das obere Ende des Aufhängungsdrahts ist an einen kleinen Torsionskreis geführt, durch welchen dem Draht beliebige Torsion erteilt werden kann. Die Dämpfung der Schwingungen erfolgt durch Flügel, welche an dem nach unten führenden Messingstäbchen befestigt sind und in einen mit Wasser gefüllten, in der Grundplatte angebrachten Hohlraum tauchen. Die Höhe der Wasseroberfläche wird durch ein seitlich angebrachtes Mariottesches Gefäß M konstant erhalten. Durch Einführung eines kleinen weichen Eisenkerns in die Achse der inneren Drahtrolle kann die Empfindlichkeit des Elektrodynamometers auf etwa das Doppelte gesteigert werden, indessen sind alsdann die Ablenkungen nicht mehr genau proportional dem Quadrate der Stromstärke.

Zur Messung starker Ströme, besonders zur Messung des Stroms von dynamoelektrischen Maschinen findet in der Technik weit verbreitete Anwendung das Torsionselektrodynamometer von Siemens und Halske (Abb. 755), welches aus einer inneren

754. Elektrodynamometer für schwache Ströme. 755. Torsionselektrodynamometer für starke Ströme.

festen und einer äußeren beweglichen Rolle besteht. Die letztere enthält nur eine einzige Windung in Form eines aus starkem Drahte gebildeten Rechtecks und ist nach Art der Aufhängungsvorrichtung beim Siemensschen Torsionsgalvanometer an einem Faden und einer Spiralfeder aufgehängt, welche zu einem randrierten Torsionsknopf geführt ist, durch dessen Drehung die Spiralfeder tordiert wird. Der Torsionswinkel wird mittels des an dem Torsionsknopf befestigten Zeigers an einer Kreisteilung abgelesen. Der zu messende Strom wird der beweglichen Rolle durch Quecksilberkontakte zugeführt und durchfließt die beiden Rollen hinter einander. Bei der Messung muß die Ebene des beweglichen Rahmens zur Windungsebene der festen Rolle senkrecht stehen. Diese Lage wird durch einen an dem beweglichen Rahmen befestigten Zeiger markiert, welcher dann auf den Nullpunkt der Kreisteilung einspielt. Der Torsionszeiger soll bei nicht tordierter Spiralfeder gleichfalls auf Null zeigen. Der die Rollen durchfließende Strom strebt, den beweglichen Rahmen parallel zur festen Rolle zu bewegen. Durch Drehen des Torsionszeigers

in der jener Bewegung entgegengesetzten Richtung wird der bewegliche Rahmen in seine ursprüngliche Lage zurückgeführt; der abgelesene Torsionswinkel ist dem Quadrate der Stromintensität proportional.

Das Elektrodynamometer findet am häufigsten Anwendung zur Messung von Wechselströmen, d. h. von kurz andauernden Strömen, welche in abwechselnd entgegengesetzter Richtung rasch auf einander folgen.

Erscheinungen der Induktion.

Wir haben im Vorhergehenden gesehen, daß Magnete und galvanische Ströme auf einander elektromagnetische und elektrodynamische Wirkungen ausüben, also Bewegungen hervorbringen können. Gemäß dem Prinzip der Umkehrbarkeit, auf welches wir beim Thermostrom und Peltierschen Phänomen hingewiesen, werden wir daher schließen dürfen, daß in einem stromlosen geschlossenen Leiter durch bloße mechanische Bewegung eines in seiner Nähe befindlichen Stroms oder Magnets Ströme hervorgerufen werden können. In der That ist dies der Fall, und man nennt solche Ströme Induktionsströme. Sie sind im Jahre 1830 von Faraday entdeckt und von ihm vollständig erforscht worden. Diese Entdeckung ist von fundamentaler Bedeutung; sie bildet einen Markstein in der Entwickelung der Elektrizitätslehre und den Grundpfeiler der Elektrotechnik.

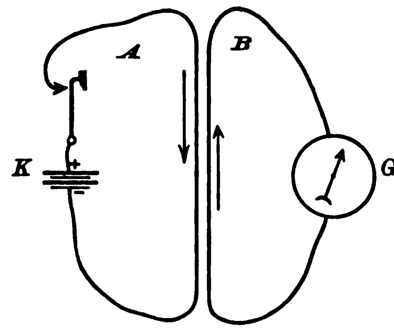


756. Michael Faraday.

Michael Faraday, einer der größten und genialsten Physiker aller Zeiten, ist im Jahre 1791 in Newington bei London als Sohn eines Schmieds geboren und war bis zu seinem 21. Lebensjahre, gleich seinem großen Vorgänger Benjamin Franklin, Buchbinder. Im Jahre 1813 wurde er Gehilfe am chemischen Laboratorium Humphrey Davys, unter dessen Leitung er seine in der Geschichte der Physik beispiellos dastehende, erfolgreiche wissenschaftliche Thätigkeit begann. Er wurde 1824 Mitglied der Royal Society und 1827 Davys Nachfolger als Leiter des Laboratoriums. In allem Autodidakt, trat er auch ohne jede mathematische Methode mit klarem Auge und scharfem, durchdringendem Verstande an Probleme, die sich vorzugsweise auf Beziehungen zwischen magnetischen und elektrischen Erscheinungen und Kraftwirkungen bezogen. Die Annahme von Fernkräften, welche nach den Newtonschen und Coulombschen Gesetzen unvermittelt durch den Raum wirken sollten, erschien seinem Geiste ungenügend und unhaltbar. Sein Hauptstreben bestand daher darin, die Theorie der Fernkräfte zu ersetzen durch diejenige der Nahkräfte, der zufolge die Kraftwirkung von Punkt zu Punkt in dem alle Körper durchdringenden und das ganze Weltall ausfüllenden Lichtäther zeitlich sich fortpflanzen. Ausgehend von dem Versuch mit den Eisenfeilspänen, welche die Verteilung der Kraft im magnetischen Kraftfelde veranschaulichen, schuf er seine Kraftlinien-

theorie, welche anfänglich unbeachtet und unverstanden, erst zu allgemeiner Anerkennung gelangt ist, seitdem Maxwell durch mathematische Formulierung ihre Klarheit und Fruchtbarkeit erwiesen hatte. Faradays elektrische Arbeiten sind in seinen berühmten „Experimental researches in electricity", mit deren Veröffentlichung er im Jahre 1831 begann, niedergelegt. Sie bergen neben vielen, umfassenden Untersuchungen auf anderen Gebieten eine Fülle glänzender Entdeckungen, wie sie kein anderer Physiker aufzuweisen hat. Er starb im Jahre 1867.

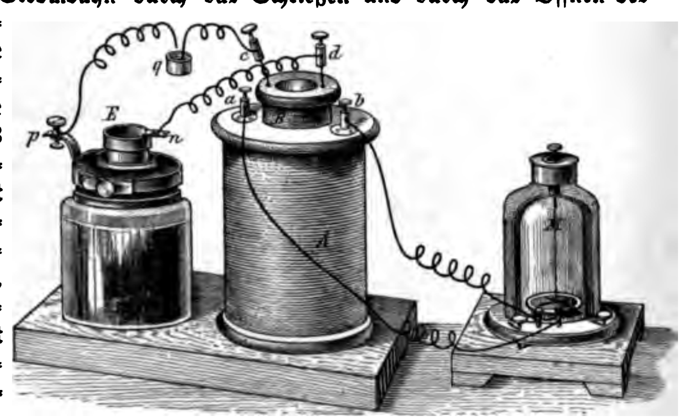
Faradays Fundamentalversuche sind nun folgende:



757. Zum Nachweis der Induktionsströme.

Es seien zwei Strombahnen (Abb. 757) gegeben, von denen die eine A, welche die primäre heißen möge, mit einer galvanischen Batterie K verbunden sei, die beliebig geschlossen oder geöffnet werden kann, während die zweite B, die sekundäre, mit einem hinreichend entfernt von der primären Strombahn A aufgestellten Galvanometer G verbunden sei, so zeigt der Versuch, daß in dem Moment, in welchem der Strom in A geschlossen wird, in B ein Strom induziert wird, dessen Richtung entgegengesetzt ist derjenigen des primären Stroms, und welcher sehr rasch verläuft. Solange nun der primäre Strom geschlossen bleibt, scheint er auf den sekundären weiter keine wahrnehmbare Wirkung auszuüben. Wird aber der primäre Strom plötzlich geöffnet, so wird wieder in der sekundären Strombahn ein momentaner Induktionsstrom erzeugt, der jetzt in derselben Richtung verläuft, wie der primäre Strom.

Diese Induktionsströme können nur auftreten infolge einer elektromotorischen Kraft, welche in der sekundären Strombahn durch das Schließen und durch das Öffnen des primären Stroms hervorgerufen wird. Auch jede Veränderung der Stromintensität in A ruft eine elektromotorische Kraft in B hervor. Nimmt die Stromintensität in A zu, so wirkt die in B induzierte elektromotorische Kraft in entgegengesetzter Richtung, wie in A; nimmt die Stromintensität in A ab, so wirkt die in B induzierte elektromotorische Kraft in derselben Richtung, wie in A. Die Induktionswirkungen treten um so stärker auf, je näher man die Strombahnen an einander legt, und wenn man letzteren die Form von Spiralen gibt, die in einander geschoben werden können. (Abb. 758). Eine wesentliche Verstärkung der Induktionswirkungen erzielt man dadurch, daß man in das Innere der Spiralen Bündel von weichen Eisendrähten bringt.



758. Prinzip des Induktionsapparats.

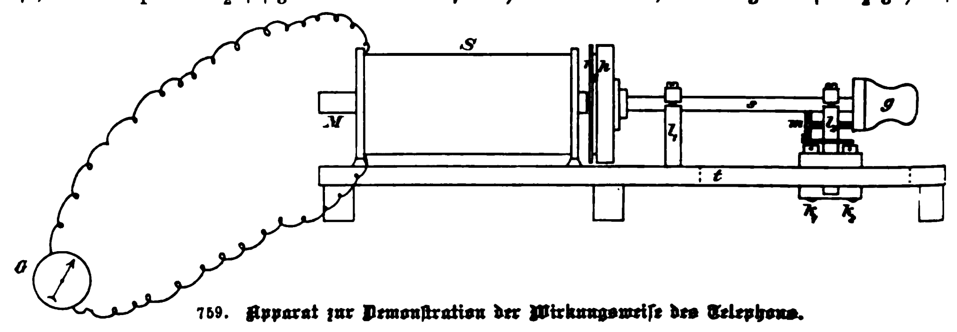
Der Versuch zeigt ferner, daß, wenn man den vom Strom durchflossenen Leiter A der Strombahn B nähert, in letzterer wieder ein Induktionsstrom hervorgerufen wird, dessen Richtung entgegengesetzt ist derjenigen des primären Stroms, und daß, wenn man A von B entfernt, in B ein Induktionsstrom auftritt, welcher mit dem primären Strom gleichgerichtet ist. Umgekehrt tritt, wenn B dem stationären Strom A genähert wird, in B ein dem primären Strom entgegengesetzter, und wenn B von A entfernt wird, ein dem primären Strom gleichgerichteter Induktionsstrom in B auf.

Ersetzt man den primären Strom A durch einen Magnet, so werden durch relative Lagenveränderung von B gegen den Magnet dieselben Induktionswirkungen erzielt, wie bei relativer Lagenveränderung von B gegen A.

Die durch einen galvanischen Strom hervorgerufene Induktion nennt man Volta-Induktion, die durch einen Magnet hervorgerufene Magneto-Induktion. Ein Unterschied in der Natur der Erscheinungen beider Arten von Induktion ist nicht vorhanden.

Prinzip des Telephons. Jede Änderung des magnetischen Zustandes im Innern der sekundären Spirale, die z. B. dadurch hervorgerufen wird, daß einem in ihr befindlichen Magnet eine Eisenplatte genähert, oder von ihm entfernt wird, ruft gleichzeitig einen Induktionsstrom in der sekundären Spirale hervor. Hierauf beruht die Einrichtung und Wirkungsweise des Bellschen Telephons, welche durch folgenden, vom Verfasser konstruierten und in Abb. 759 dargestellten Apparat veranschaulicht werden kann.

Die an dem einen Ende mit dem Griffe g versehene Spindel s ist durch die beiden Lager l_1 und l_2 so unterstützt, daß sie in ihrer Längsrichtung nach Überwindung einer geringen Reibung leicht bewegt werden kann; das andere Ende der Spindel trägt eine mit einer cylindrischen Vertiefung versehene Holzplatte h, in welche Eisenplatten e von verschiedener Dicke durch den Ring r festgeklemmt werden können. Um die Größe der Verschiebung der Spindel s mit ihren Teilen verändern zu können, ist das eine Lager l_2 auf dem Tische t in einer Nute verschiebbar und kann an jeder Stelle durch die Klemmschrauben k_1 und k_2 festgeklemmt werden, während die durch den Lagerkörper l_2 gehende,



759. Apparat zur Demonstration der Wirkungsweise des Telephons.

mit einer Trommel versehene Mikrometerschraube m zur feineren Einstellung der Verschiebungsgröße der Spindel in ihrer Achsenrichtung dient. Gegenüber der Eisenplatte befindet sich eine Spirale S, in deren Öffnung ein starker Magnet fest gelagert ist. Verbindet man die Enden der Spirale mit einem Galvanometer G, so tritt bei jedem Nähern oder Entfernen der Eisenplatte in der Spirale ein Induktionsstrom auf, dessen Stärke durch die Größe der Ablenkung der Galvanometernadel gemessen werden kann. Diese Induktionsströme entsprechen den durch die schwingende Membran im Telephon hervorgerufenen Induktionsströmen.

Das Telephon selbst hat bereits an anderer Stelle (vergl. S. 268 ff.) seine Besprechung gefunden.

Lenzsches Gesetz. Die Richtung des induzierten Stroms läßt sich durch das folgende, allgemeine, von Lenz aufgestellte Gesetz bestimmen: Wird ein Leiter in einem durch einen Strom oder durch einen Magnet hervorgerufenen magnetischen Felde bewegt, so wird in ihm ein Strom von solcher Richtung erzeugt, daß die elektrodynamische oder elektromagnetische Wechselwirkung zwischen dem induzierten und dem induzierenden Strom oder Magnet seiner Bewegung hemmend entgegenwirkt.

Es folgt hieraus folgende, bereits von Faraday gegebene, bequeme Regel für die Bestimmung der Richtung des Stroms, welcher in einem Leiter induziert wird, wenn er in einem magnetischen Felde bewegt wird: Man denke sich in der Richtung einer im magnetischen Felde befindlichen Magnetnadel liegend, den Kopf nach dem Nordpol und nach der Richtung sehend, in welcher der Leiter bewegt wird, dann geht der in dem Leiter induzierte Strom stets von links nach rechts.

Da nach dem Ampèreschen Gesetze zwei gleichgerichtete Ströme sich anziehen, zwei entgegengesetzt gerichtete sich abstoßen, so folgt, daß wir eine Abstoßung zu überwinden haben, wenn wir den Sekundärstrom dem primären nähern, und eine Anziehung, wenn wir ihn entfernen, daß also zur Erzeugung von Induktionsströmen ein mechanischer Kraftaufwand erforderlich ist, welcher auch thatsächlich beim Aufhören des Induktionsstroms in Form einer dem Kraftaufwande äquivalenten Erwärmung des sekundären Leiters zu Tage tritt.

Induktion in körperlichen Leitern. Induktionsströme entstehen nicht nur in linearen Leitern, sondern auch in körperlichen Metallmassen, wenn letztere in einem magnetischen Kraftfelde bewegt werden. Die Richtung dieser Induktionsströme ist stets, dem Lenzschen Gesetze gemäß, eine solche, daß sie der Bewegung des körperlichen Leiters hemmend entgegenwirken. Im Verfolg einer zuerst von Gambey im Jahre 1824 (später von Seebeck), gemachten Beobachtung, daß nämlich eine Magnetnadel, wenn sie über einer zu ihrer Schwingungsebene parallelen Kupferscheibe schwingt, viel schneller zur Ruhe kommt, als wenn sie über einer nicht leitenden Platte ihre Schwingungen vollführt, wurde Arago zur Entdeckung der Erscheinungen des Rotationsmagnetismus geführt. Setzt man eine vertikale Kupferscheibe um eine durch ihren Mittelpunkt gehende, horizontale Achse, etwa mittels einer Zentrifugalmaschine, in Rotation (Abb. 760), so wird eine zentrisch neben der Kupferscheibe auf dieselbe Achse aufgesetzte Magnetnadel im Sinne der Drehung der Kupferscheibe mit fortgeführt. Diese Erscheinung erklärt sich mit Hilfe des Lenzschen Gesetzes; in ihrer wahren Bedeutung wurde sie aber erst durch Faraday erkannt, welcher durch weitere Verfolgung derselben zur Entdeckung der Erscheinungen der Induktion geführt wurde. Schwingt eine Magnetnadel in der Nähe einer Kupfermasse, so werden die Schwingungen durch die in der Kupfermasse hervorgerufenen, der Bewegung entgegenwirkenden Induktionsströme gedämpft.



760.
Apparat zum Nachweis des Rotationsmagnetismus.

Man benutzt diese Thatsache bei der Konstruktion der Galvanometer, indem man die Magnete im Innern von Kupferhülsen (Dämpfern) schwingen läßt, um die Schwingungen in möglichst kurzer Zeit zur Ruhe zu bringen.

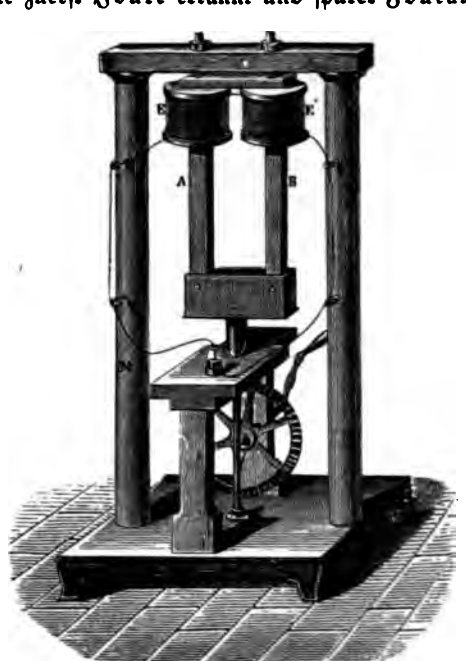
Hängt man zwischen den Polen eines nicht erregten Elektromagnets eine Kupferkugel an einem tordierten Faden auf, so gerät die Kugel, sich selbst überlassen, infolge des Aufrollens des Fadens in lebhafte Torsionsschwingungen, wird aber, sobald der Elektromagnet erregt wird, sofort zum Stillstand gebracht, weil in der Kugel bei ihrer Bewegung durch das Magnetfeld Induktionsströme entstehen, welche der Bewegung hemmend entgegenwirken.

Einen anderen, instruktiven Nachweis der Dämpfung durch Induktion liefert folgender, von A. von Waltenhofen angegebene Apparat (Abb. 761). Ein zwischen den Polen des nicht erregten Elektromagnets frei hindurch schwingendes Kupferpendel wird beim Erregen des Elektromagnets sofort arretiert.

Bewegt man eine Kupferscheibe in zu den Kraftlinien senkrechter Richtung zwischen den Polen des Elektromagnets, so macht sich ein Widerstand fühlbar, wie wenn man eine zähflüssige Masse durchschnitte.

Auch in dem massiven Eisenkern des Elektromagnets werden beim Schließen des Stroms Induktionsströme hervorgerufen, welche dem entstehenden Strome entgegengerichtet sind und dadurch das Ansteigen des Magnetismus verzögern, und ebenso werden beim Öffnen des Stroms Induktionsströme in der leitenden Eisenmasse hervorgerufen, welche mit dem verschwindenden Strome gleichgerichtet sind und das Verschwinden des Magnetismus verzögern. Es sind dies die sogenannten Foucaultschen Ströme, welche die volle praktische Ausnutzung der Elektrizität für motorische Zwecke hindern. Indem man die Eisenkerne nicht massiv, sondern aus Bündeln von dünnen Eisendrähten, die von einander gut isoliert sind, konstruiert, sucht man die Bahn der Foucaultschen Ströme zu unterbrechen und ihre Entstehung zu verhindern.

Wird zwischen den Polen eines Elektromagnets ein Metallstück durch eine mechanische Vorrichtung in schnelle Hin- und Herbewegung oder in schnelle Rotation versetzt, so wird es, wie zuerst Joule erkannt und später Foucault



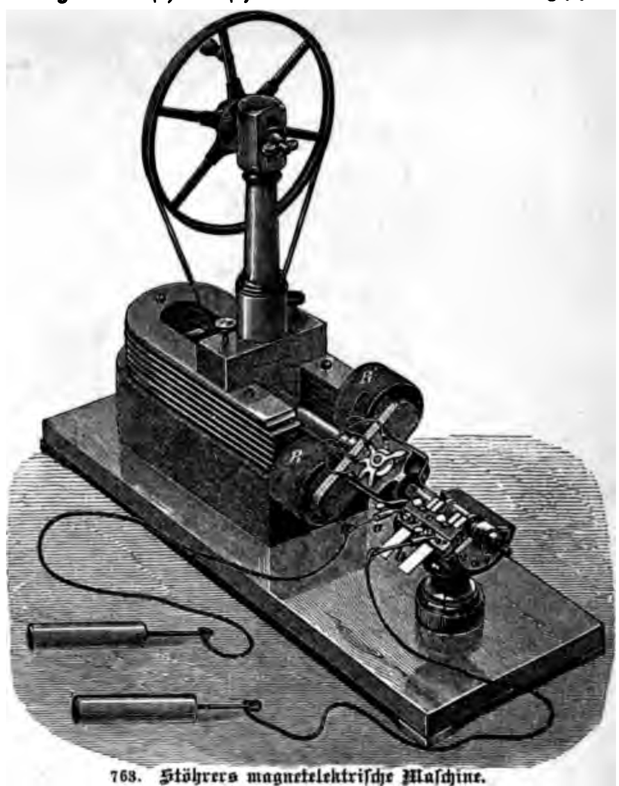
761. v. Waltenhofens Apparat.

762. Pixiis magnetelektrische Maschine.

eingehender nachgewiesen hat, stark erwärmt. Woodsche Legierung kann auf diese Weise sehr leicht zum Schmelzen gebracht werden.

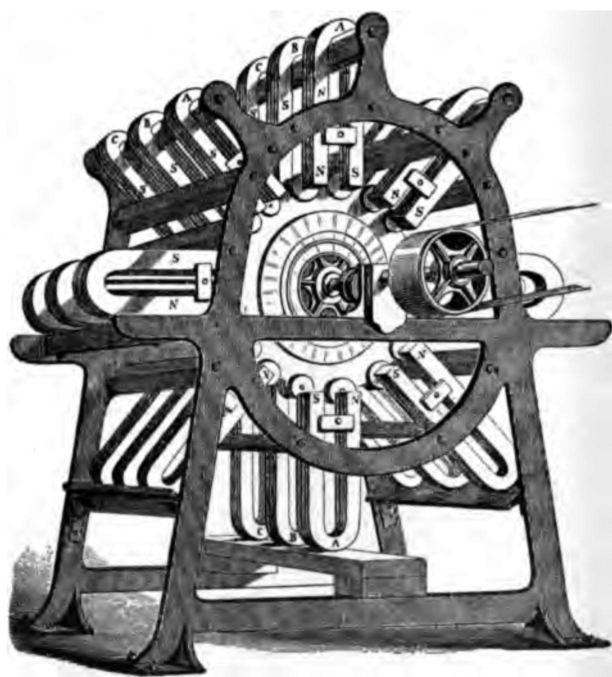
Die magnetelektrische Maschine. Wir haben vorhin gesehen, daß galvanische Ströme, ohne jede Batterie, durch bloße relative Bewegung von Magneten gegen geschlossene Spiralen erzeugt werden können. Auf diese Thatsache gründen sich die Einrichtungen der magnetelektrischen Maschinen. Die erste derselben ist im Jahre 1832, bald nachdem Faraday seine Entdeckungen veröffentlicht hatte, von Pixii konstruiert worden und wird durch Abb. 762 veranschaulicht. Vor den festen, mit Eisenkernen versehenen Drahtspiralen E und E' werden die ihnen gegenüberliegenden Pole eines Hufeisenmagnets A B mittels Kurbel und Zahnradgetriebe vorbeibewegt. Dadurch werden in den Spiralen Ströme von wechselnder Richtung induziert, welche durch Drähte zu dem kleinen Quecksilbergefäß fortgeleitet, sich in überspringenden Funken zu erkennen geben, wenn der eine dieser Drähte in das Quecksilber getaucht, der andere seiner Oberfläche nahe gebracht wird.

Bei den bald darauf von Saxton, von Clark und besonders von Stöhrer konstruierten und verbesserten Maschinen werden die Spiralen vor den Polen eines kräftigen Hufeisenmagnets in Rotation versetzt und die entgegengesetzt gerichteten Ströme durch Anwendung eines Kommutators in gleichgerichtete verwandelt (Abb. 763). Die Drahtenden der beiden Spiralen R, R' führen zu zwei auf der Rotationsachse sitzenden, von einander isolierten Schleifringen, auf denen zwei Bürsten schleifen, von denen die Ströme bei a und b fortgeleitet werden. Von der physiologischen Wirkung derselben kann man sich überzeugen, wenn man die beiden Metallcylinder in die Hand nimmt und die Ströme durch den Körper gehen läßt.



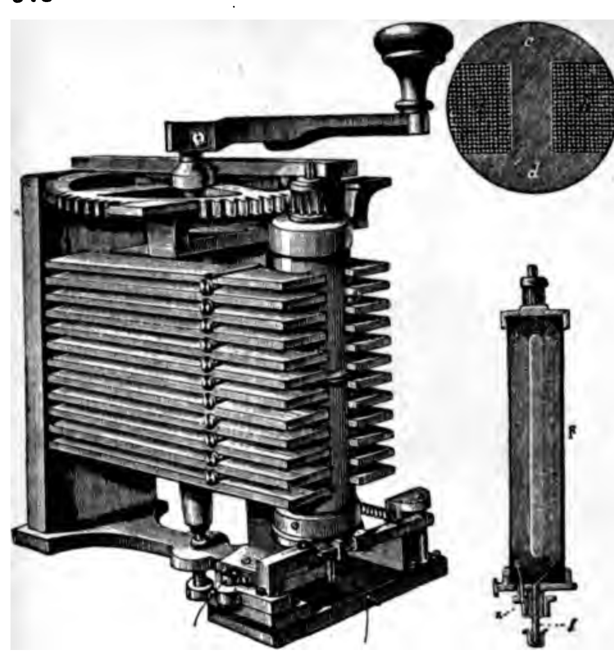
763. Stöhrers magnetelektrische Maschine.

Um stärkere Ströme zu erzielen, wurde die Anzahl der Magnete und dementsprechend die der Spiralen vermehrt; besonders wurden von der Pariser „Compagnie l'Alliance“ in den 50er Jahren für galvanoplastische Anlagen und zum Betriebe von Bogenlampen auf Leuchttürmen Riesenmaschinen konstruiert (Abb. 764), welche durch Dampfmaschinen getrieben wurden und Ströme von bedeutender Stärke lieferten. In England wurden ähnliche Maschinen von Holmes gebaut. Eine wesentliche Vervollkommnung erfuhr die Konstruktion der Anker — so werden die rotierenden Spiralen mit ihren Eisenkernen genannt — im Jahre 1856 durch Werner Siemens. In diesem Jahre erfand er seinen Doppel-T-Anker (Siemens armature), in welchem die Spiraldrähte um den Kern der Länge nach gewunden sind, so daß die Windungen parallel der Kernachse liegen; dieser Anker rotiert zwischen den Polen einer Reihe von starken Hufeisenmagneten (Abb. 765—767).



764. Alliance-Maschine zum Zweck elektrischer Beleuchtung.

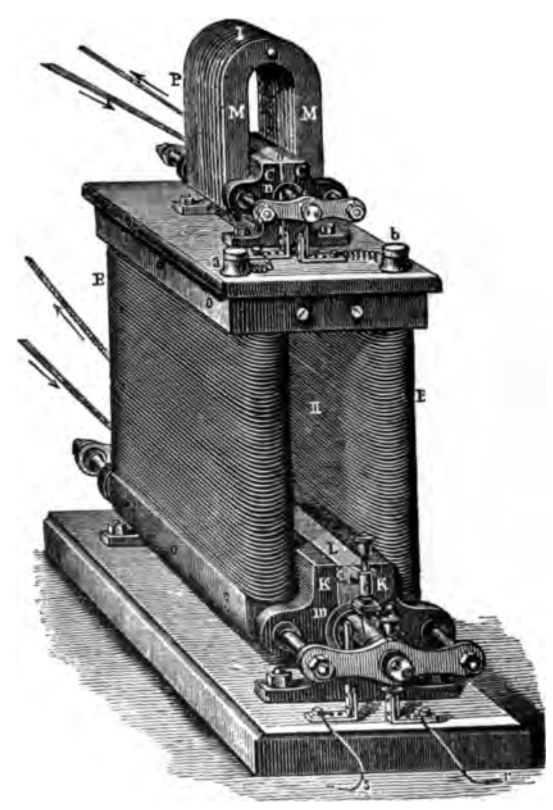
Einen weiteren bedeutenden Schritt in der Entwickelung auf diesem Gebiete machte Wilde in Manchester, indem er die Stahlmagnete durch



765—767. Siemensscher Cylinderinduktor.

einen Elektromagnet E ersetzte (Abb. 768), welcher durch eine kleinere Maschine mit Stahlmagneten M erregt wurde, und zwischen den Polschuhen K K des Elektromagnets den Siemensschen Doppel-T-Anker rotieren ließ. Er erzielte mit dieser Maschine erstaunliche Wirkungen, welche diejenigen aller früheren Maschinen weit übertrafen. Noch am Ende desselben Jahres machte dann Werner Siemens die Entdeckung, welche die größte seines thatenreichen Lebens ist, und durch die er der Begründer der modernen Elektrotechnik geworden ist. Er stellte das dynamoelektrische Prinzip auf und konstruierte die erste „dynamoelektrische" Maschine, den Zündinduktor, den er kurz vor Weihnachten 1866 einer Anzahl hervorragender Physiker vorführte.

Die erste Veröffentlichung des Prinzips war seine, wegen der Weihnachtsferien der Berliner Akademie der Wissenschaften erst am 17. Januar 1867 vorgelegte, Abhandlung: „Über die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne Anwendung permanenter Magnete." Sie schließt mit den Worten: „Der Technik sind gegenwärtig die Mittel gegeben, elektrische Ströme von unbegrenzter Stärke auf billige und bequeme Weise überall da zu erzeugen, wo Arbeitskraft disponibel ist. Diese Thatsache wird auf mehreren Gebieten derselben von wesentlicher Bedeutung sein."



768. Wildes Maschine.

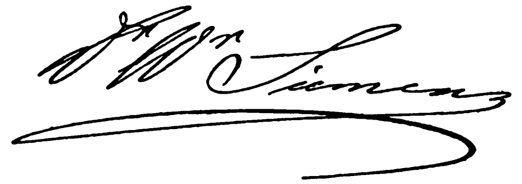
Das Prinzip ist im wesentlichen folgendes: In jedem Elektromagnet bleibt, auch wenn der magnetisierende Strom längst zu wirken aufgehört hat, eine kleine Spur von Magnetismus zurück, welche im stande ist, in einer mit weichem Eisenkern versehenen, vor seinen Polen rotierenden Spirale Induktionsströme, wenn auch von sehr geringer Intensität, zu erzeugen. Leitet man dieselben aber um den Elektromagnet, so wird sein Magnetismus verstärkt und ist daher im stande, in

der rotierenden Spirale stärkere Induktionsströme zu erzeugen. Werden diese wieder um den Elektromagnet geleitet, so steigern sie von neuem seinen Magnetismus, dessen Folge wieder die Erzeugung noch stärkerer Induktionsströme in der rotierenden Spirale ist. Auf diese Weise können aus der ursprünglich vorhandenen, unmeßbar kleinen Menge von Magnetismus durch Wechselwirkung zwischen Magnet und sekundärer Spirale in allmählicher Steigerung Ströme von beliebiger Stärke gewonnen werden.

Etwas später wie Siemens veröffentlichte der englische Physiker Wheatstone dasselbe Prinzip, auf welches er unabhängig von Siemens gekommen war.

Daß Werner Siemens sofort die ganze Tragweite seiner Erfindung erkannte, geht aus folgendem interessanten Briefe hervor, welchen er am 4. Dezember 1866 an seinen Bruder Wilhelm nach England richtete, und welchen Dr. Howe in einem „Rückblick am Tage des 50jährigen Bestehens der Firma Siemens und Halske“ (12. Oktober 1897) veröffentlichte:





769. Werner Siemens.

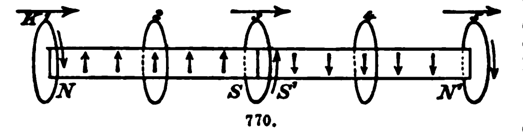
„.... Ich habe eine neue Idee gehabt, die aller Wahrscheinlichkeit nach reussieren und bedeutende Resultate geben wird.

Wie Du wohl weißt, hat Wilde ein Patent in England genommen, welches in der Kombination eines Magnetinduktors meiner Konstruktion mit einem zweiten, welcher einen großen Elektromagnet anstatt der Stahlmagnete hat, besteht. Der Magnetinduktor (wie bei den Zeigern konstruiert) magnetisiert den Elektromagnet zu einem höheren Magnetismus, wie er durch Stahlmagnete zu erreichen ist. Der zweite Induktor wird daher viel kräftigere Ströme geben, als wenn er Stahlmagnete hätte. Die Wirkung soll kolossal sein, wie in Dinglers Journal mitgeteilt.

Nun kann man aber offenbar den Magnetinduktor mit Stahlmagneten ganz entbehren. Nimmt man eine elektromagnetische Maschine, welche so konstruiert ist, daß der feststehende Magnet ein Elektromagnet mit konstanter Polrichtung ist, während der Strom des beweglichen Magnets gewechselt wird; schaltet man ferner eine kleine Batterie ein, welche den Apparat also bewegen würde, und dreht nun die Maschine in der entgegengesetzten Richtung, so muß der Strom sich steigern. Es kann darauf die Batterie ausgeschlossen und entfernt werden, ohne die Wirkung aufzuheben. Es ist mit anderen Worten eine Holtzsche Maschine, angewandt auf Elektromagnetismus.

Man kann mithin allein mit Hilfe von Drahtwindungen und weichem Eisen Kraft in Strom umwandeln, wenn nur der Impuls gegeben wird. Dieses Geben des Impulses, der die Stromrichtung bestimmt, kann auch durch den rückbleibenden Magnetismus oder durch ein Paar Stahlmagnete, die dem Kern stets einen schwachen Magnetismus geben, geschehen.

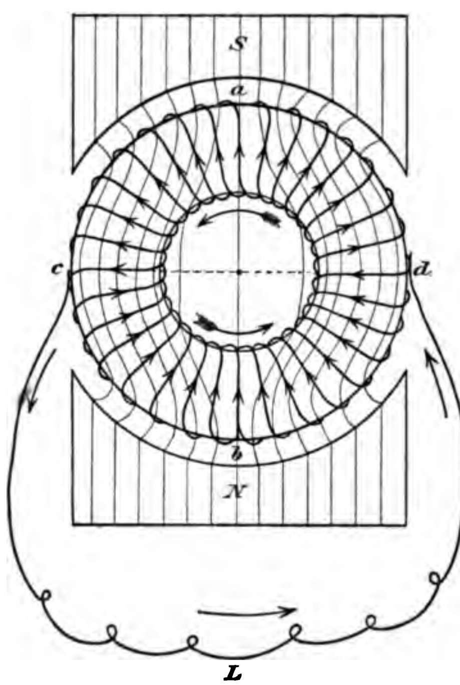
Die Effekte müssen bei richtiger Konstruktion kolossal werden. Die Sache ist sehr ausbildungsfähig und kann eine neue Ära des Elektromagnetismus anbahnen! In wenigen Tagen wird ein Apparat fertig sein .... Magnetelektrizität wird hierdurch billig werden, und es kann nun Licht, Galvanometallurgie u. s. w., selbst kleine elektromagnetische Maschinen, die ihre Kraft von großen erhalten, möglich und nützlich werden!"



770.

Ein Vierteljahrhundert später konnte Werner von Siemens in seinen „Lebenserinnerungen" schreiben, „daß die Erfindung der dynamoelektrischen Maschine die Grundlage eines großen, neuen Industriezweiges geworden ist und fast auf allen Gebieten der Technik belebend und umgestaltend eingewirkt hat und noch fortdauernd einwirkt."

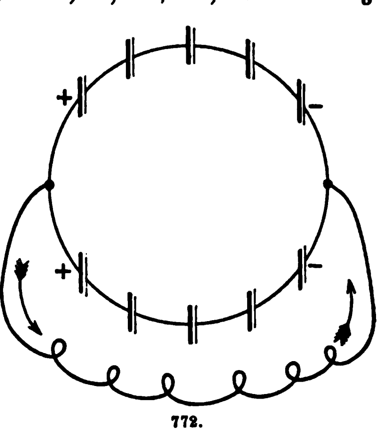
Pacinotti-Grammescher Ring. „Die dynamoelektrische Maschine war aber noch nicht fertig und hatte ihre Kinderkrankheiten noch erst zu überstehen. Als eine solche stellte sich eine neue Erscheinung, die Erhitzung des Eisens bei schnellem Wechsel der magnetischen Polarität heraus." Dem Anker mußte eine noch zweckmäßigere Form gegeben werden. Inzwischen (1860) war von Antonio Pacinotti in Florenz eine wichtige Erfindung gemacht worden, die freilich anfänglich nicht die verdiente Wertschätzung fand, sondern zu allgemeiner Anerkennung und Anwendung erst durch den aus Belgien gebürtigen Mechaniker Théophile Gramme gelangte, welcher im Jahre 1869 selbständig, und ohne die Pacinottische Erfindung gekannt zu haben, in Paris mit einer magnetelektrischen Maschine auftrat, die nach derselben Idee gebaut war. Dies war die seitdem so bekannt gewordene Pacinotti-Grammesche Ringankermaschine.



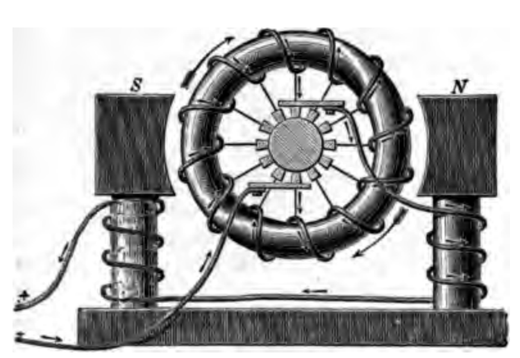
771. Pacinotti-Grammescher Ringanker.

Zum Verständnis der Wirkungsweise derselben wollen wir zunächst die Induktionserscheinungen verfolgen, welche in einem Kreisringe K stattfinden, der längs zweier, gleich langer, geradliniger, mit ihren gleichnamigen Polen an einander gelegter Magnetstäbe in der Richtung NSS'N" gleichförmig fortbewegt wird (Abb. 770). In der Lage 1 wird in K ein Strom induziert, dessen Richtung entgegengesetzt ist den Molekularströmen, welche der Theorie nach NS umfließen. In Lage 2 ist die Induktionswirkung in K Null, weil die Einwirkung der Magnetstrecke von 1—2 entgegengesetzt ist derjenigen von 2—3. In Lage 3 erreicht die Induktionswirkung auf K ihr Maximum, denn die direkte Einwirkung der Magnetstrecke 2—3 addiert sich zu derjenigen von 3—4, die Induktionswirkung ist wieder Null in Lage 4, während sie in Lage 5 denselben Sinn hat, wie in 1. Denken wir uns nun den doppelten Magnet zu einem Ringe in sich selbst geschlossen, so daß gleichnamige Pole sich bei SS' resp. NN' berühren, so werden wir zwei Maxima der Induktionswirkungen erhalten, nämlich an den Berührungsstellen der beiden gleichnamigen Magnetpole NN' resp. SS', und die Wirkungen Null an den Stellen, in denen der zur Verbindungslinie jener beiden Punkte senkrechte Durchmesser den Ring trifft. Der Magnetring möge nun ersetzt werden durch einen Ring aus weichem Eisen, welcher sich zwischen den Polen eines kräftigen Magnets, des Feldmagnets, befindet, und der einzelne Drahtring durch eine in sich geschlossene Spirale (Abb. 771). In dem Eisenring, dem sogenannten

Anker, wird nun dem Nordpol des Feldmagnets gegenüber ein Südpol, dem Südpol des Feldmagnets gegenüber ein Nordpol induziert werden. Der Verlauf der magnetischen Kraftlinien wird durch die schwach ausgezogenen Kurven veranschaulicht: die ursprünglich geraden Kraftlinien werden durch den Eisenring abgelenkt und drängen sich in ihm zusammen, so daß die meisten ihren Weg durch das Eisen hindurch nehmen, während nur wenige den inneren, vom Ringe umschlossenen Luftraum durchsetzen. Der innere Raum bildet daher nur ein schwaches Magnetfeld; zwischen den Polen N, S aber und der äußeren Ringoberfläche entstehen kräftige Magnetfelder. Wird nun der Anker in gleichförmige Rotation versetzt, so bleibt die Lage der Ankerpole im Raume dieselbe; die den beiden Elektromagnetpolen N, S zunächst liegenden Stellen b, a des rotierenden Ankers werden stets den stärksten, die von beiden gleich weit entfernten Stellen c, d keinen Magnetismus zeigen. Auf die einzelnen Windungen der geschlossenen Ankerspirale werden dieselben Induktionswirkungen ausgeübt werden, wie wenn — was praktisch schwer ausführbar ist — der Eisenring festläge, und die Spirale sich gleichförmig um ihn herumbewegte. Die Ströme, deren Richtungen nach dem Lenzschen Gesetze durch die Pfeile angegeben werden, wirken in den beiden Ringhälften, der oberen und unteren, einander entgegen und heben sich in der geschlossenen Ankerleitung auf. Verbindet man aber die beiden Interferenzstellen c und d mittels Schleiffedern durch eine äußere Leitung L, so werden in diese von den beiden Ringhälften gleichgerichtete Ströme gesandt. Man kann die Anordnung mit einer galvanischen



772.



773. Schema der Pacinotti-Grammeschen Ringmaschine.


774. Ring der Grammeschen Maschine, durchschnitten.

Batterie vergleichen, die aus zwei gegen einander geschalteten Hälften besteht, deren jede die gleiche Anzahl hinter einander geschalteter Elemente enthält (Abb. 772). In einer solchen Anordnung heben sich auch die Ströme gegenseitig auf. Verbindet man aber die beiden mit einander verbundenen positiven Pole und ebenso die beiden mit einander verbundenen negativen Pole durch eine äußere Leitung, dann fließt in ihr der Strom von dem einen Polpaar zum andern.

Abb. 773 zeigt schematisch die Pacinotti-Grammesche Ringmaschine. Von jeder Windung führt ein Draht zu einem horizontalen Kupferstreifen. Sämtliche Kupferstreifen bilden einen Kreiscylinder mit horizontaler Achse; sie sind von einander und von der Welle gut isoliert. Auf dem Cylinder schleifen Federn, Bürsten, welche den Strom von den Indifferenzstellen abnehmen. Abb. 774 stellt einen durchschnittenen Grammeschen Ring dar. Zur Verhütung des Auftretens der Foucaultschen Ströme besteht er nicht aus massivem Eisen, sondern aus einem Bündel von Eisendrähten und ist umwickelt von kurzen Drahtspiralen,

die zu einer zusammenhängenden Leitung dadurch verbunden sind, daß jedes Ende der einen mit dem Anfang der nächsten und dem zugehörigen Ableitungsstreifen verbunden ist.

Die Konstruktion des Grammeschen Rings bildet einen bemerkenswerten Fortschritt in der Elektrotechnik, da die Anwendung desselben es ermöglicht, gleichmäßige Ströme von unveränderter Richtung, sogenannte Gleichströme, zu erhalten.

Wir müssen es uns versagen, den Gang der Entwickelung zu verfolgen, welchen die Dynamomaschine für Gleichstrom genommen hat durch die Konstruktionen von Hefner v. Alteneck, von Edison, von Schuckert und von vielen anderen Ingenieuren und hervorragenden elektrotechnischen Etablissements (Siemens und Halske, Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft), und die Ausbildung, welche die Maschinen für Wechselstrom (durch Ganz und Co., die Gesellschaft Helios, durch Thomson-Houston, Westinghouse, durch die Gesellschaft Örlikon u. a.) und für Drehstrom (durch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft, Dolivo v. Dobrowolski, Tesla, durch Siemens und Halske, Schuckert u. v. a.) erfahren haben. Unsere Aufgabe ist es, die physikalischen Grundlagen der Elektrotechnik zu geben, während diese selbst an anderer Stelle unseres Werks ihre Behandlung findet.

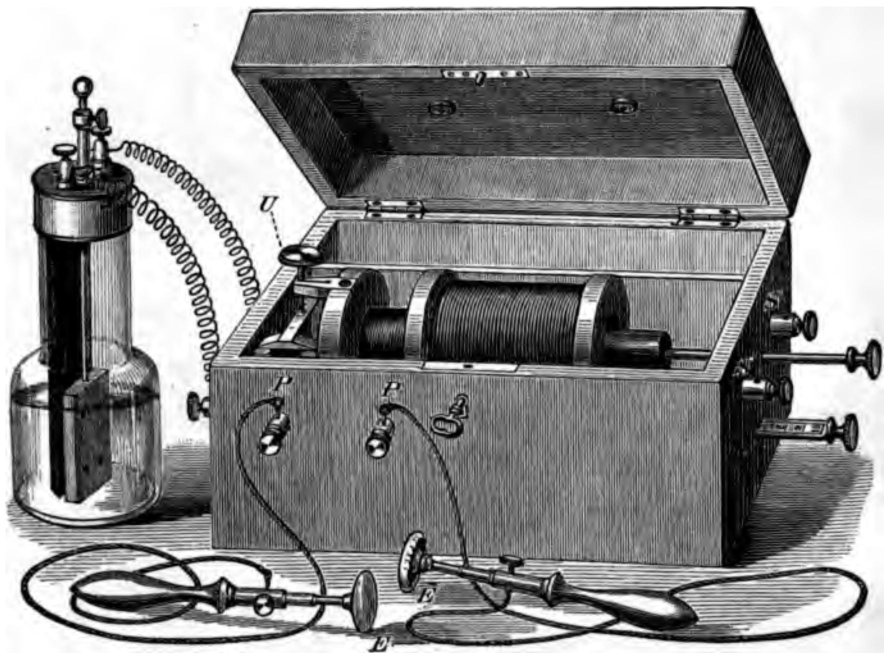
775.

Selbstinduktion. Jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt in seiner Umgebung ein magnetisches Kraftfeld. Das Entstehen oder Verschwinden des Stroms in dem Leiter oder auch nur eine Intensitätsänderung ist von einer Änderung des magnetischen Kraftfelds begleitet, die Anzahl der vom Leiter durchschnittenen Kraftlinien ändert sich, und dadurch wird in dem Leiter selbst eine elektromotorische Kraft induziert. Man nennt diese Erscheinung Selbstinduktion oder Induktion eines Stroms auf sich selbst, und den durch die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion hervorgerufenen Strom Extrastrom (Extrakurrent). Sowohl der Schließung wie der Öffnung des ursprünglichen Stroms entspricht ein Extrastrom. Der der Schließung entsprechende Extrastrom ist stets der Richtung des ihn erzeugenden Hauptstroms entgegengesetzt; er setzt seinem Entstehen einen Widerstand entgegen und verlangsamt sein Anwachsen, der Öffnungsextrastrom verlangsamt das Abnehmen des Hauptstroms, er verstärkt ihn und hat daher einen intensiveren Verlauf. Die Selbstinduktion eines Leiters ist wesentlich durch seine Form bedingt. Biegt man einen Draht z. B. in seiner Mitte um, so daß er doppelt erscheint (Abb. 775), so hat der Strom in beiden Hälften entgegengesetzte Richtung, die Selbstinduktion ist dann gering. Man benutzt diese Eigenschaft bei der Herstellung von Widerstandsdrähten (Bifilarwickelung), um möglichst induktionsfreie Leitungswiderstände zu erzielen. Biegt man den Draht auf, so wird seine Selbstinduktion größer: sie wird noch bedeutender, wenn man ihm die Form einer Spirale gibt, und wird erheblich gesteigert, wenn man in die Spirale einen Kern von weichem Eisen hineinschiebt. Jeder Leiter besitzt einen bestimmten Selbstinduktionskoeffizienten, dessen Größe durch die Form, die Dimensionen und die Wickelung des Leiters bedingt ist.

Öffnet man den von einer Batterie gebildeten Stromkreis, indem man z. B. einen der Zuleitungsdrähte aus einem Quecksilbernäpfchen heraushebt, so beobachtet man einen sehr kurze Zeit andauernden Öffnungsfunken. Vor dem Verschwinden des Stroms bildet sich an der Unterbrechungsstelle eine Brücke leitender Teilchen von großem Widerstande, die zum Glühen gebracht werden. Der Öffnungsfunke wird, wenn eine Spirale eingeschaltet ist, bedeutend vergrößert, weil zu der ursprünglichen elektromotorischen Kraft diejenige des Öffnungsstroms hinzukommt.

Induktionsapparat. Der Induktionsapparat besteht aus einer in den Kreis einer Batterie eingeschaltenen primären Spirale von starkem, isoliertem Draht, die von einer aus sehr vielen Windungen dünnen Drahts bestehenden sekundären Spirale umgeben ist, und aus einer automatisch wirkenden Vorrichtung, welche in rascher Aufeinanderfolge Schließung und Öffnung des primären Stroms herzustellen ermöglicht (vergl. S. 552). Im Innern der primären Spirale befindet sich ein Bündel isolierter weicher

Eisendrähte, durch welches die in der sekundären Spirale induzierten Schließungs- und Öffnungsströme in erheblichem Maße verstärkt werden. Die Größe der Wirkung hängt ab von der Anzahl der Windungen, auf deren Isolierung die größte Sorgfalt zu verwenden ist. Durch Steigerung der Windungsanzahl lassen sich leicht Induktionswirkungen erzielen, welche die Wirkung des primären Stroms um das Tausendfache und darüber übertreffen. Man hat sekundäre Spiralen mit 100000 Windungen konstruiert, wozu je nach dem Durchmesser 100000 m dünnen Drahts und darüber erforderlich sein können, und hat dadurch außerordentlich hohe Spannungen erreicht. Verbindet man die Enden der sekundären Spirale solcher Induktorien mit zwei gegen einander verschiebbaren Metallspitzen, oder nur das eine Ende mit einer Spitze, das andere mit einer Metallplatte, so erhält man zwischen ihnen, wie von einer starken Elektrisiermaschine, Funken, deren Länge mit der Spannung zunimmt, so daß umgekehrt die Entfernung, bis zu welcher Funken überspringen, die Schlagweite des Induktoriums, als Maß für die von ihm zu erzeugende

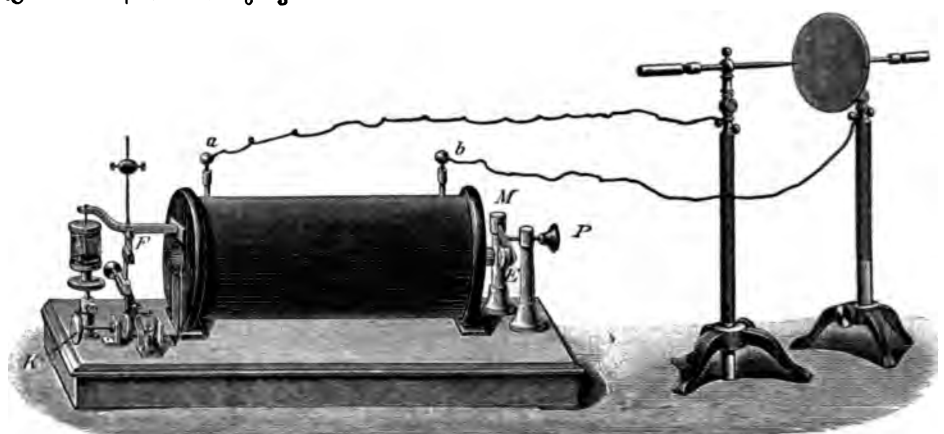


776. Schlitteninduktorium nach Du Bois-Reymond.

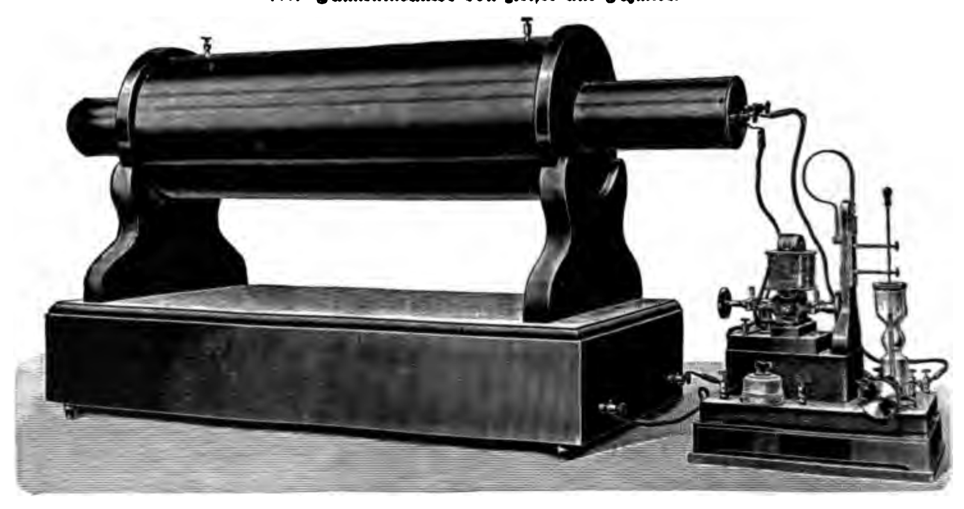
Spannung angesehen werden kann. Bei einem primären Strom von etwa sechs Bunsenschen Elementen liefern große Induktorien, wie sie zuerst Ruhmkorff in Paris gebaut hat, dem zu Ehren sie auch Ruhmkorffsche Funkeninduktoren genannt werden, bei rascher Stromunterbrechung Funken bis zu 1 m Länge. Um solche Wirkungen zu erzielen, kommt es darauf an, beim Unterbrechen des primären Stroms die Zeit des Verschwindens desselben, also auch den an der Unterbrechungsstelle sich bildenden, durch die Selbstinduktion verstärkten Öffnungsfunken, möglichst klein zu machen. Zu diesem Zwecke werden nach Fizeau zwei auf verschiedenen Seiten der Unterbrechungsstelle liegende Punkte des Unterbrechers mit den beiden Stanniolbelegungen eines Plattenkondensators verbunden, dessen isolierende Schichten gewöhnlich aus paraffiniertem Papier oder besser aus Glimmer bestehen. Die durch die Selbstinduktion nach der Unterbrechungsstelle bewegte Elektrizitätsmenge fließt dann zum größten Teile auf die Belegungen des Kondensators, der eine große Kapazität besitzt, wird also von der Unterbrechungsstelle fortgezogen, wodurch der Öffnungsfunke und seine Zeitdauer verkleinert wird.

Abb. 776 stellt ein Schlitteninduktorium nebst Zubehör nach Du Bois-Reymond, wie es für medizinische Zwecke verwandt wird, dar. Der Strom für die primäre

Spirale wird durch ein Flaschenelement geliefert und durch den Selbstunterbrecher U (vergl. S. 552) geschlossen und geöffnet. Die sekundäre Spirale und der Eisenkern können über, beziehungsweise in der primären Spirale meßbar verschoben werden, um die Wirkung zu schwächen oder zu verstärken. Die Enden der sekundären Spirale führen zu den Klemmen P, P. Bei Berührung der mit diesen leitend verbundenen, mit Schwammhüllen versehenen Elektrodenhalter E, E kann man sich von den physiologischen Wirkungen der Induktionsströme überzeugen.



777. Funkeninduktor von Keiser und Schmidt.

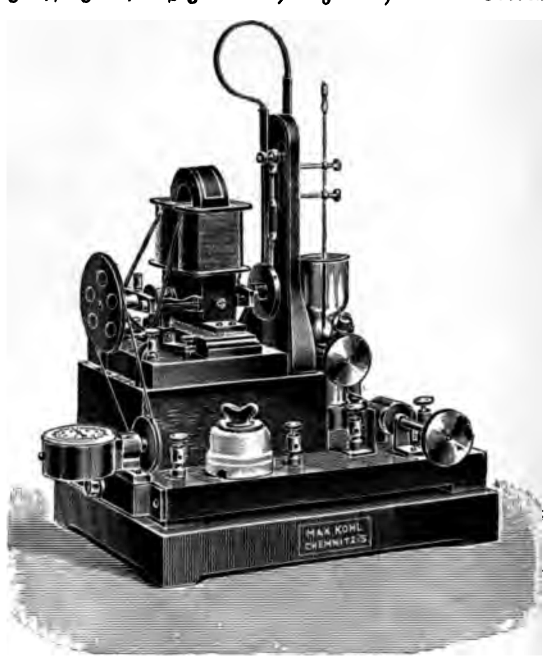


778. Funkeninduktor von Max Kohl.

Abb. 777 zeigt einen Funkeninduktor mittlerer Größe von Keiser und Schmidt in Berlin, der mit zwei Unterbrechern versehen ist. Der rechts befindliche Federunterbrecher besteht aus einer bei M befestigten, mit einer Eisenplatte E versehenen Messingfeder, die bei geöffnetem Strom mit einem auf ihr befindlichen Platinplättchen gegen den verstellbaren Platinstift P drückt, und bei geschlossenem Strom von dem Eisenkern der primären Spirale angezogen wird. M und P sind mit den beiden Belegungen des im Boden des Apparats befindlichen Kondensator verbunden. Der links befindliche Quecksilberunterbrecher, welcher auch häufig angewandt wird, ermöglicht es, die Zahl der Unterbrechungen durch Verstellung des Laufgewichts nach Bedürfnis größer oder kleiner zu wählen. Eine mittels Trieb- und Zahnstange höher oder tiefer zu stellende starke Messingfeder F ist mit einem zweiarmigen Hebel versehen, welcher an einem Ende einen eisernen Anker, am anderen

einen Stift trägt, der bei geöffnetem Strom in Quecksilber taucht, bei geschlossenem Strom herausgezogen wird. Zur Verhütung der Oxydation des Quecksilbers durch die Luft, wird auf dasselbe eine Alkoholschicht gegossen. K ist ein Ruhmkorffscher Kommutator (vgl. S. 583), der einerseits mit der Stromquelle und andererseits mit den Enden der primären Spirale verbunden ist. Die Enden der sekundären Spirale sind zu den Klemmen a und b geführt.

Abb. 778 stellt einen großen von Max Kohl in Chemnitz konstruierten Funkeninduktor mit schnell rotierendem Unterbrecher dar, welcher für Röntgen-Photographie und Durchleuchtung besonders geeignet ist. Für die Röntgen-Photographie ist es nämlich wünschenswert und wichtig, die Expositionsdauer möglichst zu verkürzen und für die Durchleuchtung, den Fluorescenzschirm möglichst gleichmäßig beleuchtet zu erhalten. Beides wird erreicht, wenn die Unterbrechungen möglichst schnell und gleichmäßig sicher stattfinden. Der rotierende Quecksilberunterbrecher (Abb. 779), welcher 1000—2000 Unterbrechungen in der Minute liefert, besteht aus einem kleinen Elektromotor, welcher mittels eines Kurbelzapfens und einer Pleuelstange einen Platinsilberstift in ein höher oder tiefer zu stellendes Quecksilbergefäß taucht und herauszieht. Mit Hilfe des an dem Unterbrecher angebrachten Tachymeters läßt sich genau die zurückgelegte Tourenzahl ermitteln, indem der ruhig stehende Zeiger desselben auf der Skale anzeigt, ob der Motor konstant 1200, 1600 oder 2000 Umdrehungen in der Minute macht. Treten Schwankungen in der Tourenzahl ein, so verändert der Zeiger seine Stellung, während er bei unveränderter Tourenzahl ruhig steht. Zur Verhütung der Oxydation des Quecksilbers ist auf dasselbe eine Petroleumschicht gegossen, und damit dieses nicht bei den schnellen Unterbrechungen herausgeschleudert wird, ist das Gefäß mit zwei Einschnürungen versehen. Der Unterbrecher, welcher einen Ausschalter für den Motor und einen Kommutator für den Strom des Induktors besitzt, ist auf einen schweren, auf einer starken Filzplatte ruhenden Eisenfuß aufgeschraubt.



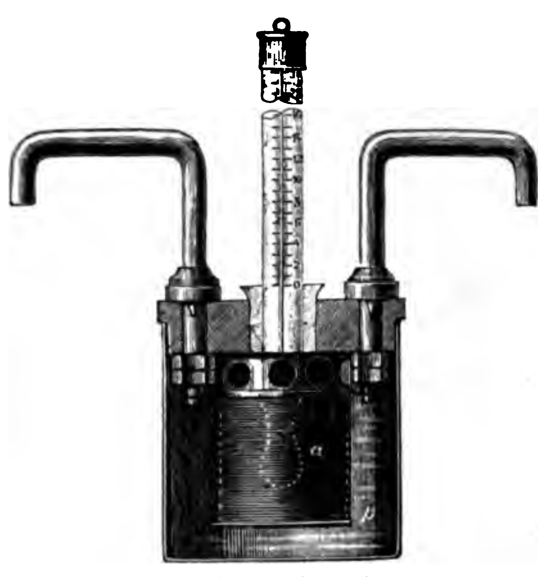
779. Kohls rotierender Unterbrecher mit Tachymeter.

Die elektromagnetischen Maßeinheiten und Meßmethoden.

Elektrostatisches und elektromagnetisches Maßsystem. Einheit der Stromstärke. Das Ampère. Messung der Stromstärke. Einheit der Elektrizitätsmenge. Einheit des Widerstands. Das Ohm. Normalwiderstände. Messung des Widerstands von festen Leitern und von Elektrolyten. Einfluß der Temperatur. Bolometer. Einheit der elektromotorischen Kraft. Das Volt. Normalelemente. Messung der elektromotorischen Kraft. Kompensationsmethode. Einheit der Kapazität. Das Farad. Kondensatoren. Messung der Kapazität. Sekunden-Volt-Ampère. Volt-Ampère.

Die im Vorhergehenden besprochenen Wirkungen des galvanischen Stroms werden zur Messung der elektrischen Größen und zur Definition ihrer Maßeinheiten benutzt. Die elektromagnetischen und elektrodynamischen Wirkungen, welche ein stromdurchflossener Leiter in seiner Umgebung ausübt, stellen sich, wie wir sahen, als anziehende und abstoßende, also als rein mechanische Wirkungen dar. Umgekehrt wird ein Leiter, der durch eine rein mechanische Kraft in einem magnetischen oder elektrischen Kraftfeld mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegt wird, der Sitz einer elektromotorischen Kraft. Diese

wechselseitigen Beziehungen finden darin ihren Ausdruck, daß die elektrischen Größen ebenso wie die mechanischen nach absolutem Maße, d. h. durch Zentimeter, Gramm und Sekunde gemessen werden können. Geht man von der mechanischen Wechselwirkung aus, welche zwei elektrisierte Körper auf einander ausüben, so gelangt man zum elektrostatischen Maßsystem, welches nur ein rein wissenschaftliches, theoretisches Interesse hat, während man auf das elektromagnetische Maßsystem geführt wird, wenn man von der mechanischen Wirkung ausgeht, welche ein Strom auf einen Magnet ausübt. Das letztere ist von hervorragend praktischer Bedeutung und bildet die Grundlage für die Definition der in der Elektrotechnik gebräuchlichen praktischen Maßeinheiten. Wohl waren für die elektrischen Größen seit langer Zeit Maßeinheiten in Gebrauch, aber verschiedene Einheiten für dieselbe Größe nicht nur in verschiedenen Ländern, sondern auch in einem und demselben Lande. Mit dem Aufblühen und der Entwickelung der modernen Elektrotechnik machte sich aber das Bedürfnis nach Herstellung eines einheitlichen, universellen, elektrischen Maßsystems immer dringender fühlbar, und im Anschluß an die internationale elektrische Ausstellung in Paris fand im Jahre 1881 ein internationaler Elektrikerkongreß statt, welcher sich die Aufgabe stellte, auf Grundlage des Gauß-Weberschen absoluten Maßsystems ein universelles elektrisches Maßsystem festzustellen, praktische Einheiten für die wichtigsten elektrischen Größen zu definieren, beziehentlich herzustellen und so gewissermaßen eine einheitliche Sprache für alle quantitativen, magnetischen und elektrischen Beziehungen und Untersuchungen zu schaffen. Es handelt sich hierbei vorzugsweise um die Einheiten folgender fünf Größen: Stromstärke, Elektrizitätsmenge, Widerstand, elektromotorische Kraft und Kapazität.



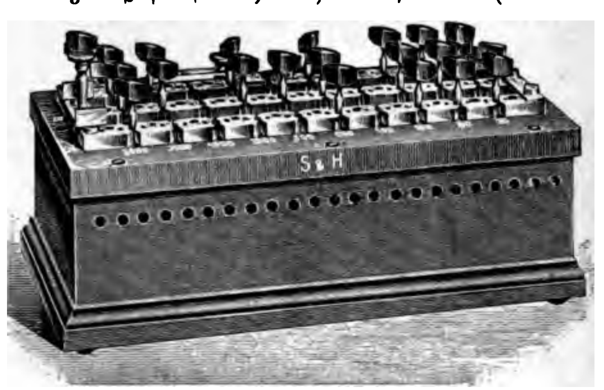
780. Normalwiderstand.

Die theoretische oder absolute Einheit für die Stromstärke und die daraus abgeleitete praktische Einheit, das Ampère, ist schon früher (vgl. S. 535 u. 542) definiert worden. Auch die elektrochemische Definition des Ampère haben wir bereits (vgl. S. 557 u. 558) gegeben und an den erwähnten Stellen auch die Methoden der Strommessung mittels des Galvanometers und des Voltameters beschrieben. Der tausendste Teil des Ampère heißt Milliampère.

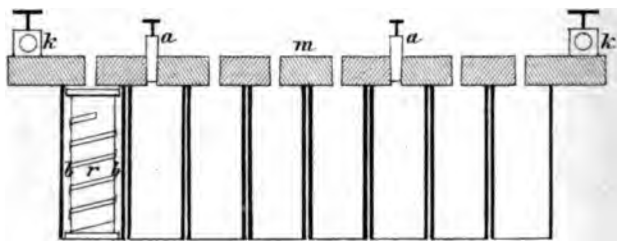
Die theoretische Einheit der Elektrizitätsmenge ist diejenige Elektrizitätsmenge, welche in der Zeiteinheit durch den Querschnitt eines von der Stromeinheit durchflossenen Leiters fließt. Der zehnte Teil derselben gilt unter der Bezeichnung Coulomb als praktische Einheit für die Elektrizitätsmenge. Ein Coulomb ist also diejenige Elektrizitätsmenge, welche in jeder Sekunde durch den Querschnitt eines von einem Ampère durchflossenen Leiters strömt. 1 Coulomb = 1 Ampère $\times$ 1 Sekunde; 1 Ampèrestunde ist demgemäß gleich $60 \times 60 = 3600$ Coulomb.

Die theoretische Einheit des Widerstands ist der Widerstand eines Leiters, in welchem die Stromeinheit in der Zeiteinheit die Arbeitseinheit leistet (vergl. S. 563 u. 564). Die praktische Widerstandseinheit ist 1000 Millionen mal größer als die theoretische und heißt Ohm. Die Herstellung eines genauen Widerstandsmaßes ist von fundamentaler Bedeutung für alle elektrischen Untersuchungen. Die anderen elektrischen Größen sind komplizierter und schwieriger zu messen, und es lassen sich für dieselben Vergleichsnormale auch nur schwer herstellen. Hat man aber den Widerstand

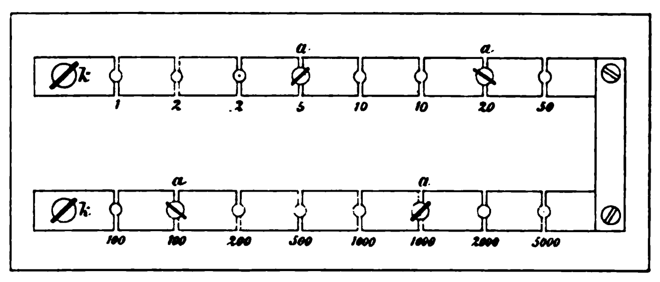
eines geeignet gestalteten Körpers von bestimmtem Material einmal bestimmt, so kann er als Prototyp benutzt werden, um aus ihm die Widerstände anderer Körper abzuleiten. Nach dem Vorgange von Werner Siemens hat man Quecksilber als das geeignetste Material gewählt und aus den vielen sorgfältigen Ohmbestimmungen, welche von hervorragenden Forschern der verschiedenen Nationen ausgeführt worden sind, den wahrscheinlichsten Wert des theoretischen Ohm abgeleitet und als wahres Ohm definiert den Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° C. Demgemäß ist also auch 1 Ohm = 1,063 S. E. (Siemens-Einheiten). Als Urnormal des Widerstands gilt der Widerstand der Quecksilberfüllung einer von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ausgewählten und aufzubewahrenden Glasröhre, dessen Wert in Ohm nach dieser Festsetzung ermittelt und von Zeit zu Zeit kontrolliert wird. Als Hauptnormale für die amtliche Beglaubigung der in den Verkehr gelangenden Widerstände sind solche aus geeigneten Metallverbindungen hergestellt, deren Widerstandswert in Ohm durch Anschluß an das Urnormal ermittelt und durch periodische Vergleichungen mit demselben sicher gestellt wird. In den letzten Jahren hat die genannte Behörde Normalwiderstände von 0,0001 Ohm bis zu 10000 Ohm hergestellt. Abb. 780 stellt einen solchen Widerstand dar. Als Material ist Manganinkupferdraht gewählt, welcher auf eine Messingrolle aufgewickelt ist. In dem oberhalb der Wickelung frei bleibenden Raume der Rolle ist ein Kranz von Löchern eingebohrt, um eine freie Zirkulation des die



781. Stöpselrheostat von Siemens und Halske.



782. Innere Einrichtung des Stöpselrheostaten.



783. Stöpselrheostat, Ansicht von oben.

Büchse ausfüllenden Erdöls zu ermöglichen. Die Enden des Drahts sind mit Silber an Kupferscheibchen gelötet, welche mit den unteren Enden starker, u-förmig gebogener Kupferzuleitungen verschraubt und verlötet sind. Die längeren Schenkel derselben durchsetzen den Hartgummideckel; mit den kürzeren Schenkeln wird die Büchse bei der Messung in Quecksilbernäpfe eingehängt. Die Temperatur kann mittels eines in die Büchse gesteckten Thermometers bestimmt werden. Solche Einzelwiderstände lassen sich zu einem Widerstandsetalon oder Widerstandssatz in analoger Weise anordnen, wie Gewichtssätze nach Vielfachen und Bruchteilen der Gewichtseinheit angeordnet werden. Abb. 781 stellt einen Widerstandsetalon oder Stöpselrheostaten von Siemens und Halske dar, welcher die Widerstandswerte von 0,1 bis 5000 Ohm, im ganzen 10000 Ohm enthält. Die innere

Einrichtung ist aus Abb. 782 ersichtlich, während Abb. 783 die Ansicht von oben gibt. Auf dem Ebonitdeckel ist eine Anzahl starker Messingstücke m in kleinen Abständen von einander angeordnet. Je zwei derselben können durch konisch sorgfältigst eingeschliffene und mit isolierenden Griffen versehene Messingstöpsel a metallisch mit einander verbunden werden. Im Innern des Kastens befinden sich die Drahtwiderstände, welche den auf dem Deckel vermerkten Widerstandswerten entsprechen, und welche spiralförmig und bifilar auf Ebonitspulen aufgewickelt, mit ihren Enden an Kupferstäbe b, b angelötet und durch letztere mit je zwei benachbarten Messingstücken metallisch verbunden sind. Ist ein Stöpsel fest eingeschaltet, so setzt er dem durchfließenden Strom einen kleinen, im allgemeinen zu vernachlässigenden Widerstand entgegen; ist er dagegen herausgezogen, so wird die entsprechende Widerstandsspirale in den Stromkreis eingeschaltet. In den Kastenwänden angebrachte Öffnungen bezwecken eine Ventilation der Luft behufs Temperaturausgleichung im Innern. Die Widerstandswerte entsprechen einer bestimmten, auf dem Deckel vermerkten Temperatur.

Sehr kleine Widerstände stellt man aus parallel geschalteten und rostartig angeordneten Drähten her, deren Enden um Kupferschienen gewickelt und mit denselben verlötet sind; sehr große Widerstände bis zu Millionen Ohm kann man bequem dadurch herstellen, daß man auf Ebonit- oder Glasplatten Bleistiftstriche zieht und deren Enden mit sicheren, metallischen Kontakten versieht. Die Firma Siemens und Halske konstruiert z. B. Graphitwiderstandsetalons von 1 bis 100 Millionen Ohm.

Den millionten Teil des Ohm nennt man **Mikrohm**, das Millionfache des Ohm **Megaohm** oder **Megohm**. Allgemein pflegt man durch Vorsetzen von μικρός (klein) den millionten Teil und durch Vorsetzen von μέγας (groß) das Millionfache einer Größe zu bezeichnen.

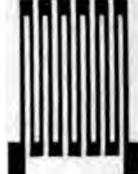
Wir haben bereits (vgl. S. 553) gesehen, daß der **spezifische Widerstand** für die verschiedenen Metalle verschieden ist. Er ist ferner in hohem Maße von der chemischen Reinheit derselben und von der Art der mechanischen Behandlung, welcher sie unterworfen gewesen, z. B. ihrem Härtegrade, abhängig.

Auf die interessante Beziehung zwischen Wärme- und elektrischem Leitungsvermögen der Metalle ist gleichfalls bereits früher (vgl. S. 475) hingewiesen worden. In folgender Tabelle sind die spezifischen Widerstände, beziehentlich Leitungsfähigkeiten einiger Metalle zusammengestellt:

Substanz bei 18° C.	Widerstand eines 1 m langen Drahts von 1 qmm Querschnitt in Ohm	Leitungsfähigkeit bezogen auf Quecksilber bei 0° C.
Silber	0,016	59
Kupfer	0,017	55
Gold	0,023	41
Zink	0,063	15
Eisen	0,09 bis 0,15	6 bis 10
Stahl	0,15 bis 0,5	2 bis 6
Platin	0,14	6,5
Blei	0,21	4,6
Antimon	0,45	2,1
Quecksilber	0,958	0,984
Wismut	1,2	0,8
Gaskohle	50 bis 70	0,02 bis 0,015
Messing	0,07 bis 0,09	10 bis 14
Neusilber	0,16 bis 0,40	2,4 bis 6

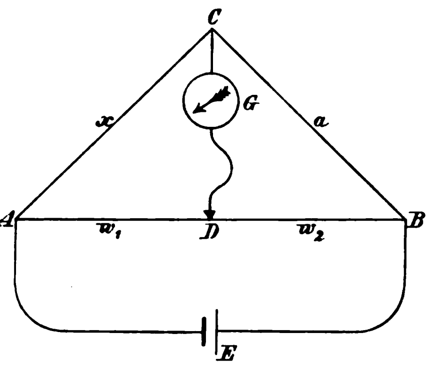
Der Widerstand der Metalle nimmt mit der Temperatur zu und zwar beim flüssigen Quecksilber um 0,00088, bei den reinen festen Metallen um etwa 0,004 seines Wertes pro 1° C. Der Widerstand der Kohle nimmt pro 1° C. um 0,0003 seines Wertes ab. In neuerer Zeit werden für die Herstellung von Widerständen vorzugsweise Nickelkupfer- und Mangankupferlegierungen, „Nickelin“, „Konstantan“, „Manganin“, „Patentnickel“, angewandt, die einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten der Widerstandsänderung besitzen, so daß letztere für die in der Praxis vorkommenden Messungen vernachlässigt werden kann.

Das Bolometer. Auf der Anwendung der Thatsache, daß der Leitungswiderstand der Metalle durch Erwärmung vergrößert wird, beruht die besonders von S. P. Langley ausgebildete **bolometrische Messungsmethode**, welche anfänglich nur bei Untersuchungen über strahlende Wärme (vgl. S. 476 u. 477), in neuerer Zeit aber auch für elektrische Messungen, z. B. zur Messung der Stärke von Wechselströmen und von Entladungen angewandt wurde. Das Prinzip besteht darin, durch die Widerstandsänderung eines dünnen, bestrahlten Leiters dessen Temperatur, beziehentlich die Intensität der Strahlung zu messen. Zur Messung der Widerstandsänderung benutzt man nach Langley die sogleich zu beschreibende Wheatstonesche Brückenanordnung, in deren einen Zweig der zu bestrahlende Leiter, das **Bolometer** (Abb. 784), in Gestalt von reihenförmig angeordneten, schmalen und sehr dünnen (etwa 0,001 mm) Metallstreifen, am besten aus Stanniol oder aus Platin, eingeschaltet wird.


784. Bolometer.

Die Flüssigkeiten haben ein sehr viel geringeres Leitungsvermögen als die Metalle. So ist z. B. bezogen auf Quecksilber von 0° C. das Leitungsvermögen

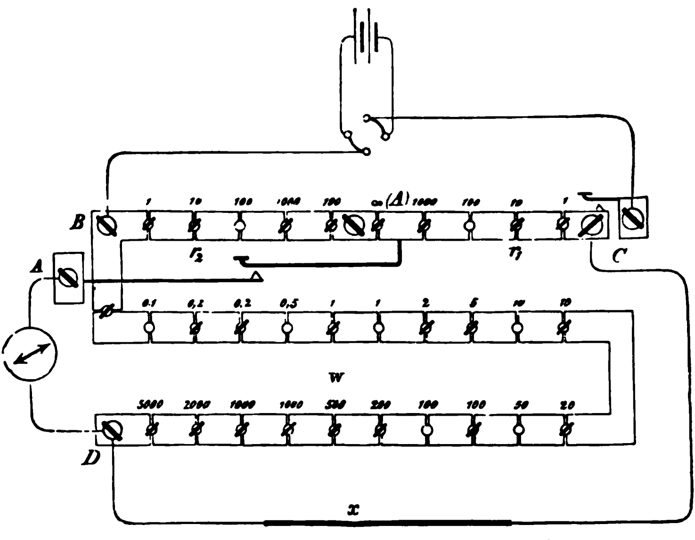
20%iger Schwefelsäure . .	bei 18° C.	0,0000611,
„ Salpetersäure . .	„ „	0,0000665,
„ Salzsäure . . .	„ „	0,0000713,
„ Kochsalzlösung .	„ „	0,0000183,
„ Zinksulphatlösung	„ „	0,0000043.



785. Wheatstone-Kirchhoffsche Brückenkombination.

Das Leitungsvermögen der Flüssigkeiten nimmt in hohem Maße mit der Temperatur zu; ferner nimmt es im allgemeinen mit der Konzentration zu; einige Flüssigkeiten aber, z. B. verdünnte Schwefelsäure, Salpetersäure, Zinkvitriol und andere besitzen bei einer bestimmten Konzentration ein Maximum des Leitungsvermögens.

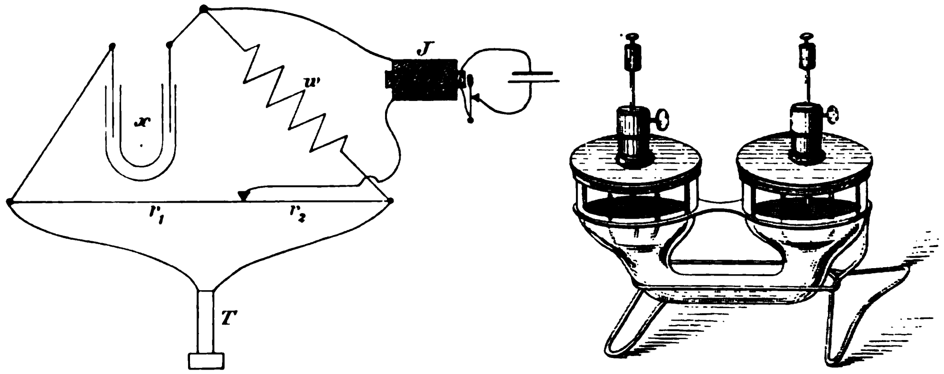
Widerstandsmessung. Die beste Methode zur genauen Vergleichung von Widerständen ist die mittels der **Wheatstoneschen Brücke**, deren Prinzip wir bereits (vgl. S. 537 und 538) besprochen haben. Was die chemische Wage für Massenbestimmungen ist, das ist die Wheatstonesche Brücke für Widerstandsbestimmungen. Eine sehr gebräuchliche und bequeme Form der Meßbrücke ist die zuerst von G. **Kirchhoff** angegebene (Abb. 785). Bei dieser bildet die Summe der beiden Zweigwiderstände w_1 und w_2 eine konstante Größe und wird durch einen über eine Millimeterskala ausgespannten, gleichmäßigen Draht aus Nickelin, oder besser aus Platin oder Platiniridium, den **Meßdraht** AB, dargestellt. In den einen Seitenzweig wird der zu bestimmende Widerstand x eingeschaltet, in den anderen ein bekannter Rheostaten-



786. Universalmeßbrücke von Siemens und Halske.

widerstand a. Der eine Diagonalzweig (**Brückenzweig**) enthält ein Galvanometer G, der andere die Meßkette E. Auf dem Meßdraht läßt sich ein Kontakt D, welcher das eine Ende des Brückenzweigs bildet, verschieben, bis durch das Galvanometer kein Strom fließt, seine Ablenkung also Null ist. Dann verhält sich $x : a = w_1 : w_2$, also ist der gesuchte Widerstand $x = a \frac{w_1}{w_2}$. Ist der Meßdraht genau cylindrisch, so ist das durch die Kontaktstellung gegebene Widerstandsverhältnis gleich dem an der Millimeterskala abzulesenden Längenverhältnis der beiden Teile des Meßdrahts.

Abb. 786 stellt eine für Messungen in der Praxis sehr geeignete **Universalmeßbrücke** von Siemens und Halske schematisch dar. Die Vergleichswiderstände r_1 und r_2 sind durch je einen Satz von 1, 10, 100, 1000 Ohm und der Widerstand W durch einen die Einzelwiderstände 0,1 — 5000 Ohm enthaltenden Stöpselrheostaten gebildet. Durch passende Wahl der Stöpsel kann man dem Übersetzungsverhältnis $\frac{r_1}{r_2}$ die Werte 0,001, 0,01, 0,1, 1, 10, 100, 1000 geben. Außerdem besitzt der Apparat einen Schlüssel, um die Kette zu schließen und zu öffnen, einen zweiten, um das Galvanometer einzuschalten, und einen Kommutator zur Vertauschung der Zweige.



787. Messung des Widerstands von Elektrolyten. 788. Widerstandsgefäß.

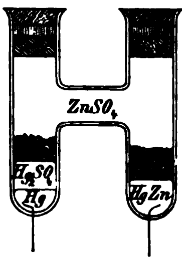
Die genaue **Bestimmung des Widerstands eines Elektrolyten** ist mit Schwierigkeiten verknüpft, weil er beim Durchgang des Stroms zersetzt und die Zersetzungsprodukte zu den Elektroden überführt, letztere also **polarisiert** werden. Es müssen daher bei der Bestimmung des Widerstands zersetzbarer Flüssigkeiten besondere Methoden angewandt werden, um entweder den störenden Einfluß der Polarisation zu bestimmen und aus dem Messungsresultate zu beseitigen, oder um dieselbe aufzuheben. Zu diesem Zwecke wendet man nach dem Vorgange von F. **Kohlrausch**, anstatt des von einer Batterie gelieferten gleichgerichteten Stroms, rasch auf einander folgende **Wechselströme** von entgegengesetzter Richtung und gleicher Gesamtstärke an; dann wird nämlich die durch den einen Stromstoß erzeugte Polarisation der Elektroden durch den darauf folgenden Stromstoß, der ja dem vorhergehenden entgegengesetzt gerichtet ist, aufgehoben.

Als Stromerzeuger benutzt man die sekundäre Spirale eines Induktoriums mit rascher Stromunterbrechung. Die zu untersuchenden Flüssigkeiten befinden sich in geeigneten Widerstandsgefäßen (Abb. 788) mit Elektroden aus platiniertem Platinblech. Als Meßinstrument ist aber anstatt des Galvanometers ein Elektrodynamometer oder bequemer ein Telephon anzuwenden. Die Schaltung ist aus der schematischen Zeichnung, Abb. 787, ersichtlich. Der Kontakt wird auf dem Meßdraht so lange verschoben, bis man im Telephon kein Geräusch hört; dann ergibt sich wieder der gesuchte Widerstand aus der Beziehung $x : w = r_1 : r_2$.

Die **theoretische Einheit für die Potentialdifferenz und elektromotorische Kraft** ist diejenige elektromotorische Kraft, welche in einem Leitungskreise

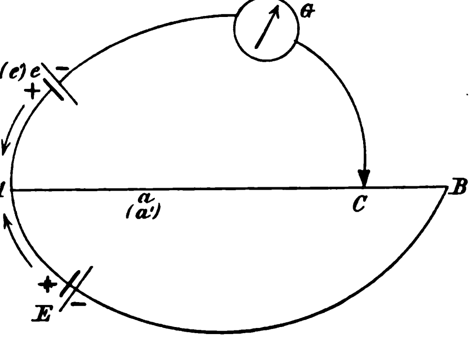
von der Einheit des Widerstands die Einheit der Stromstärke hervorruft. Das Hundertmillionenfache dieser Einheit bildet die praktische Einheit für die elektromotorische Kraft und heißt Volt. 1 Volt erzeugt in einem Leitungskreise von 1 Ohm einen Strom von 1 Ampère. Nach dem Ohmschen Gesetze ist 1 Ampère = $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$.

Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt stellt konstante galvanische Normalelemente her, deren elektromotorische Kraft sie in Volt ermittelt, um sie dann mit amtlichen Beglaubigungsscheinen versehen zur Ausgabe gelangen zu lassen. Unter den vielen gebräuchlichen Normalelementen zeichnet sich besonders das von Latimer Clark angegebene in Bezug auf Unveränderlichkeit und Reproduzierbarkeit aus (Abb. 789). Es besteht aus Quecksilber oder amalgamiertem Platin (als positiver Elektrode) in schwefelsaurem Quecksilberoxydul und amalgamiertem Zink (als negativer Elektrode) in Zinksulphat. Seine elektromotorische Kraft ist sehr konstant; sie ändert sich, wenn die angewandten Substanzen chemisch rein waren, nach den Untersuchungen der Reichsanstalt, jahrelang nicht um 0,0001 Volt; sie beträgt bei + 15° C. 1,434 Volt und nimmt in mittleren Temperaturen pro 1° C. um etwa 0,0012 Volt ab. Dieselbe Konstanz der elektromotorischen Kraft und eine weit geringere Abhängigkeit derselben von der Temperatur zeigt das Westonsche Normalelement, welches aus Quecksilber oder amalgamiertem Platin (als positiver Elektrode) in schwefelsaurem Quecksilberoxydul und Kadmiumamalgam (als negativer Elektrode) in Kadmiumsulphat besteht. Seine elektromotorische Kraft beträgt bei mittlerer Temperatur 1,025 Volt und nimmt pro 1° C. um etwa 0,00001 Volt ab.



789. Latimer Clarksches Normalelement.

Messung elektromotorischer Kräfte. Um die elektromotorischen Kräfte zweier konstanten Elemente e und e' mit einander zu vergleichen, bildet man einen Stromkreis aus dem einen Elemente e, einem empfindlichen Galvanometer und einem Widerstand, der so groß ist, daß gegen ihn der Widerstand des Elements vernachlässigt werden kann, und beobachtet den Ausschlagswinkel α der Galvanometernadel; alsdann ersetzt man e durch e' und beobachtet den entsprechenden Ausschlagswinkel α', dann verhalten sich die elektromotorischen Kräfte wie jene Winkel, oder genauer wie die Tangenten derselben. Eine genauere Methode, die auch für inkonstante Elemente anzuwenden ist, ist die zuerst von Poggendorff angegebene und von Bosscha, v. Waltenhofen, du Bois-Reymond u. a. modifizierte Kompensationsmethode. Mit den Enden des Meßdrahts AB (Abb. 790) wird eine konstante Kette E verbunden, deren elektromotorische Kraft größer ist als jede der beiden mit einander zu vergleichenden Elemente e und e'. Das Element e wird dem Element E entgegengeschaltet, so daß also die positiven Ströme nach A fließen, und durch Verschieben des Kontakts C der Strom im Galvanometer G auf Null gebracht. Hierauf wird e durch e' ersetzt und wieder durch Verschieben des Kontakts der Strom im Galvanometer zum Verschwinden gebracht. Findet dies bei den Drahtlängen a und a' statt, so verhalten sich die elektromotorischen Kräfte e : e' wie a : a'.



790. Kompensationsmethode.

Auch mittels des Torsionsgalvanometers (vgl. S. 545 ff.) lassen sich elektromotorische Kräfte bequem vergleichen und messen.

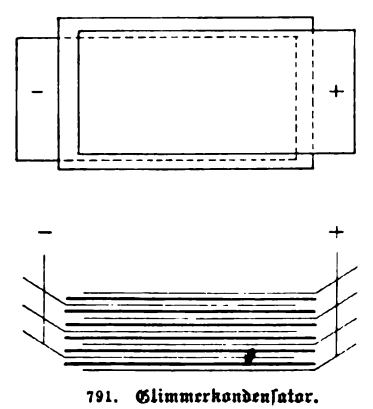
In Bezug auf die Größe der elektromotorischen Kräfte der gebräuchlichsten Elemente (vergl. S. 532 ff.) sei noch angeführt, daß die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elements je nach der Konzentration der Lösungen zwischen 1,07 und 1,18 Volt schwankt,

die des Groveschen 1,8—1,9 Volt, des Bunsenschen 1,9—1,95, des Leclanchéschen etwa 1,3—1,4 und die einer Akkumulatorenzelle abgerundet 2 Volt beträgt, und daß angenähert die thermoelektrische Kraft einer Gülcherschen Thermosäule (S. 568) von 50 Elementen den Wert 3,9 Volt erreichen kann.

Die *theoretische Einheit der Kapazität* besitzt ein Kondensator, wenn er durch die Einheit der Elektrizitätsmenge zur Einheit der Potentialdifferenz geladen wird. Diese Einheit ist von enormer Größe; sie ist zehntausendmillionenmal größer als die Kapazität der Sonne. Man hat daher als praktische Einheit der Kapazität den tausendmillionten Teil derselben definiert und mit *Farad* bezeichnet. *Ein Kondensator besitzt die Kapazität eines Farad, wenn er durch die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb zur Potentialdifferenz 1 Volt geladen wird.*

1 Coulomb = 1 Farad × 1 Volt.

Wegen der enormen Größe auch des Farad hat man für den praktischen Gebrauch den millionten Teil desselben, das *Mikrofarad* eingeführt und Normalkondensatoren konstruiert, deren Kapazitäten 1, 1/2, 1/10, 1/100 Mikrofarad betragen.



791. Glimmerkondensator.

Als Isolator für einen Kondensator eignet sich am besten Glimmer. Die Anfertigung eines *Glimmerkondensators* erfolgt in der Weise, daß abwechselnd Glimmerscheiben und Stanniolblätter von rechteckiger Form in der durch Abb. 791 angedeuteten Weise über einander geschichtet werden. Jedes Stanniolblatt ragt auf einer Seite aus der Schicht der Glimmerscheiben hervor, während es auf den übrigen drei Seiten den Rand derselben nicht erreicht; die Stanniolblätter ragen abwechselnd nach entgegengesetzten Seiten hervor, die Blätter 1, 3, 5, 7 u. s. w. nach rechts, die Blätter 2, 4, 6 u. s. w. nach links; die nach einer Seite vorstehenden Enden werden metallisch mit einander verbunden und bilden zusammen eine Belegung. Auf diese Weise lassen sich Kondensatoren herstellen und nach Art der Widerstandetalons anordnen.

Zur Herstellung großer, in der telegraphischen Praxis vorkommenden Kondensatoren bis zu 100 und 1000 Mikrofarad wählt man anstatt des teuren Glimmers als Isolator feines Papier, welches mit gut gereinigtem Paraffin, Wachs, Schellack u. s. w. getränkt ist.

Man vergleicht die Kapazitäten zweier Kondensatoren, indem man sie einzeln durch eine und dieselbe konstante Batterie ladet und durch ein empfindliches Galvanometer von großer Schwingungsdauer (ballistisches Galvanometer) entladet. Die Kapazitäten verhalten sich dann wie die Galvanometerausschläge.

Die Kapazität einer Leydener Flasche von 2,5 qm einseitiger Belegung beträgt bei einer Glasdicke von 2—3 mm etwa 0,008—0,007 Mikrofarad, die Kapazität eines submarinen Kabels etwa 0,3—0,5 Mikrofarad pro Knoten (1 Knoten oder 1 Seemeile = 1,852 km).

Einheiten für die Stromarbeit und für den Stromeffekt. Aus den im Vorhergehenden behandelten elektrischen Einheiten sind vom Pariser Elektrikerkongreß auch noch neue Maßeinheiten für die Arbeit und den Arbeitseffekt abgeleitet worden. Man versteht allgemein unter *Stromarbeit* das Produkt aus elektromotorischer Kraft, Stromstärke und Zeitdauer des Stroms, oder das Produkt aus elektromotorischer Kraft und Elektrizitätsmenge, und definiert demgemäß als praktische Einheit der Stromarbeit das *Sekunden-Volt-Ampère* oder das *Volt-Coulomb*, d. i. die von einem Strome von 1 Ampère, dessen elektromotorische Kraft 1 Volt ist, in 1 Sekunde geleistete Arbeit. Diese Arbeit heißt auch 1 *Joule* und entspricht angenähert 0,102 Kilogrammmeter.

Unter *Stromeffekt* versteht man die in der Zeiteinheit geleistete Arbeit; die praktische Einheit desselben ist also das *Volt-Ampère* = 1 Watt = 1 Joule per Sekunde, angenähert = 0,102 Kilogrammmeter per Sekunde.

Als größere Einheit für den Stromeffekt ist ferner in der Elektrotechnik gebräuchlich das

Kilowatt = 1000 Watt.

Die Begriffe Volt-Coulomb und Volt-Ampère bieten, wie schon die Wortbildung andeutet, eine vollständige Analogie zu den mechanischen Begriffen Kilogrammmeter und Kilogrammmeter per Sekunde. Wie 1 Kilogrammmeter die Arbeit darstellt, die geleistet wird, wenn 1 kg aus 1 m Höhe herabfällt, so drückt das Volt-Coulomb die Arbeit aus, die vom Strom geleistet wird, wenn 1 Coulomb von einem bestimmten Potentialniveau auf ein um 1 Volt tieferes Potentialniveau überströmt. Indem der Strom einen Leiter durchfließt, hat er seinen Widerstand zu überwinden und leistet Arbeit, die in Form von Wärme und Licht auftritt. Die Größe des Arbeitseffekts hängt von der Stromstärke und der elektromotorischen Kraft ab und wird in Volt-Ampère gemessen. Die Gleichung

1 Volt-Ampère = 1 Watt

dient uns als Mittel, elektrische Energie in mechanischem Maße auszudrücken und umgekehrt mechanische Energie in elektrische umzurechnen.

Die Faraday-Maxwellsche elektromagnetische Lichttheorie. Hertzsche Schwingungen. Die Hertzschen Versuche über Ausbreitung der elektrischen Kraft. Teslas Versuche. Marconis Funkentelegraphie.

Faraday war der erste, welcher bei seinem Bestreben, die Einheitlichkeit der Naturerscheinungen nachzuweisen und dadurch eine möglichst umfassende und einfache Anschauungsweise über das Wesen der Naturkräfte zu gewinnen, der Vorstellung Ausdruck gab, daß die magnetischen und elektrischen Kräfte nicht unvermittelt in die Ferne wirken, sondern durch ein Medium von Punkt zu Punkt fortgepflanzt werden. Indem er diese Anschauungsweise mit logischer Konsequenz bei seinen Experimentaluntersuchungen verfolgte, gelangte er zu den epochemachenden Entdeckungen der Induktion und der interessanten Beziehungen von Licht, Magnetismus und Elektrizität. Eine Hauptfrage, die ihn beständig auf das lebhafteste beschäftigte, war die, ob die magnetischen und elektrischen Kräfte Zeit zu ihrer Ausbreitung nötig hätten. Wenn wir plötzlich einen Elektromagnet erregen, ist seine Wirkung sofort und zu gleicher Zeit an den nächsten wie an den entferntesten Stellen bemerkbar, oder pflanzt sie sich von Punkt zu Punkt durch das dazwischenliegende Medium fort? Und wenn wir mittels eines Induktoriums rasch auf einander folgende Wechselströme erzeugen, schwankt dann die elektrische Kraft zu derselben Zeit an allen Stellen des Raumes, oder bemerkt man die Schwankungen zuerst an den benachbarten und später an entfernteren Stellen? In letzterem Falle müssen wir annehmen, daß durch die elektrische Schwankung die Teilchen der Luft oder des Äthers in ihr elektrische Veränderungen ihres Zustandes erleiden, welche sich allmählich weiter ausbreiten, daß an einer bestimmten Stelle ein periodisch wechselnder Zustand herrscht, daß die elektrische Schwankung sich als eine Welle fortpflanzt, und daß hierzu eine bestimmte Zeit nötig ist. Faradays Ideen blieben lange Zeit hindurch, da sie der herrschenden Auffassungsweise widersprachen und völlig fremdartig erschienen, unbeachtet; ihre Bedeutung und Fruchtbarkeit wurde erst erkannt, nachdem sie durch den berühmten englischen Physiker James Clerk Maxwell zu einer scharfsinnigen, streng mathematischen Theorie ausgebildet worden waren, die seitdem (1865) unter dem Namen der elektromagnetischen Lichttheorie bekannt ist. Den Ausgangspunkt dieser Theorie bildete für Maxwell die Thatsache, daß in den Wechselbeziehungen zwischen Magnetismus und Elektrizität eine bestimmte Größe auftritt, die sogenannte kritische Geschwindigkeit, deren Wert durch elektrische Messungen übereinstimmend mit dem der Lichtgeschwindigkeit gefunden worden war. Diese merkwürdige Übereinstimmung hielt Maxwell für keine zufällige, sondern für eine Folge davon, daß derselbe Äther die elektrischen Kräfte und das Licht übermittelt. Nach Maxwell besteht das Licht in einer elektrischen Wellenbewegung, welche sich transversal zum Wellenstrahl fortpflanzt, indem die einzelnen, auf ihm befindlichen Äther-

teilchen nach einander dieselben elektrischen Veränderungen erleiden, und in Abständen gleich einer halben Wellenlänge entgegengesetzte elektrische Zustände oder entgegengesetzt gerichtete elektrische Kräfte herrschen.

Den experimentellen Beweis für die Richtigkeit der Faraday=Maxwellschen Theorie geliefert zu haben, ist das unsterbliche Verdienst von Heinrich Hertz, jenes unvergeßlichen, der Wissenschaft allzu früh entrissenen genialen Forschers, welcher während der leider so kurzen Zeit seines Lebens doch eine Fülle wichtigster Entdeckungen gemacht und der Physik neue Bahnen der Forschung eröffnet hat. Hertz ist es gelungen, die Wellennatur der elektrischen Kraft experimentell nachzuweisen und zu zeigen, daß Strahlen elektrischer Kraft sich nach denselben Gesetzen wie Lichtstrahlen fortpflanzen. Seine Arbeiten über elektrische Schwingungen, welche in rascher Aufeinanderfolge erschienen und seinen Ruhm weit über die ganze

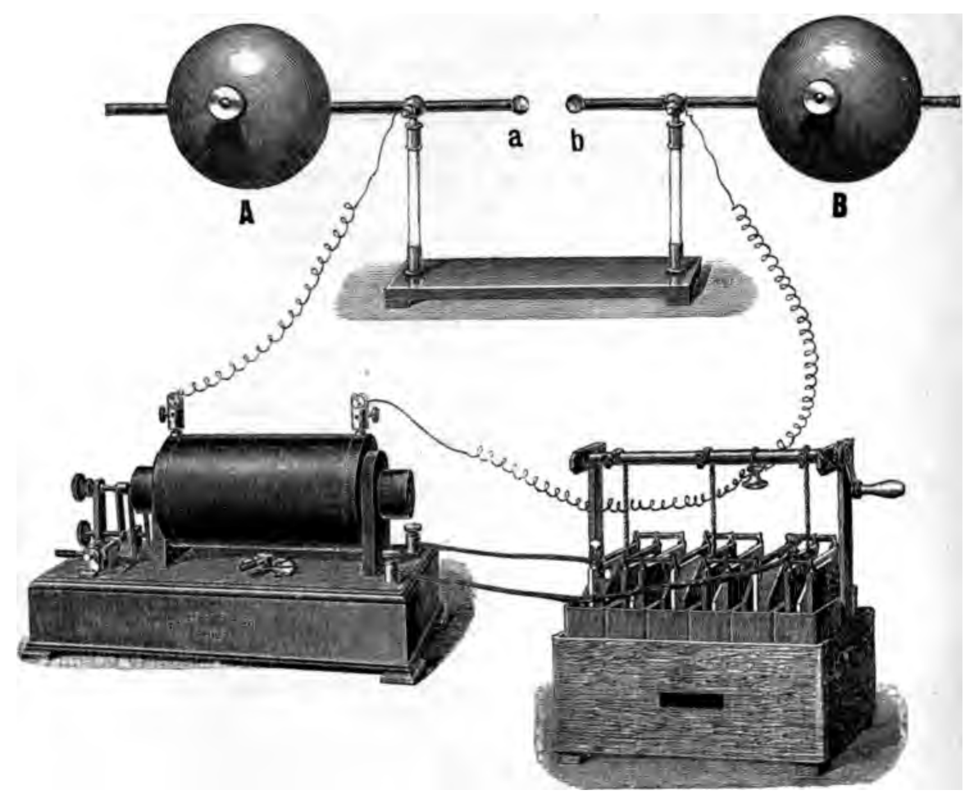


792. Heinrich Hertz.
Geb. 1857 in Hamburg, gest. 1894 als Professor der Physik zu Bonn.

wissenschaftliche Welt verbreiteten, hat er in einem besonderen Buche „Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft", welches im Jahre 1892 erschien, zusammengefaßt. Dieses Buch, in dessen Einleitung er uns eine wahrheitsgetreue Schilderung des Entwickelungsgangs seiner Entdeckungen gibt, wird für immer zu den schönsten Schätzen der physikalischen Litteratur zählen.

Hertzsche Schwingungen. Elektrische Schwingungen können wir durch die Entladung einer geladenen Leydener Flasche hervorbringen. Wir haben früher (S. 513) erwähnt, daß diese Entladung kein einfacher, gleichförmig ablaufender Vorgang ist, sondern daß sie aus einer großen Anzahl oscillierender, rasch auf einander folgender Partialentladungen von gleicher Periode besteht. Die Dauer jeder einzelnen Partialentladung ist viel kleiner, als die der Gesamtentladung, sie hängt wesentlich von der Kapazität der Flasche ab und beträgt, wenn letztere klein ist, etwa 1 Milliontel Sekunde. In dieser Zeit breitet sich die elektrische Schwingung, da ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Theorie nach so groß wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts ist, also etwa

300000 km in der Sekunde beträgt, schon auf eine Entfernung von 300 m aus; es ist also erklärlich, daß in einem gewöhnlichen Laboratorium auf diesem Wege die zeitliche Verbreitung schnell wechselnder Schwingungen von solcher Wellenlänge nicht sichtbar gemacht werden kann. Damit dies möglich sei, mußte zunächst die Aufgabe gelöst werden, elektrische Schwingungen herzustellen, die so schnell aufeinander folgen, daß ihre Wellenlänge in der Luft in einem mäßig ausgedehnten Raume bequem zu messen ist. Hertz löste diese Aufgabe, indem er zeigte, daß unter geeigneten Bedingungen Entladungen zwischen ungeschlossenen Leitungen Schwingungen hervorrufen, deren Periode viel kleiner ist, als bei den durch die Entladung einer Leydener Flasche erzielten. Verbindet man z. B. zwei gerade starke, in Kugeln endigende Drähte mit den Polen der sekundären Spirale eines Funkeninduktors (Abb. 793), dessen primäre Spirale durch eine geeignete Batterie erregt



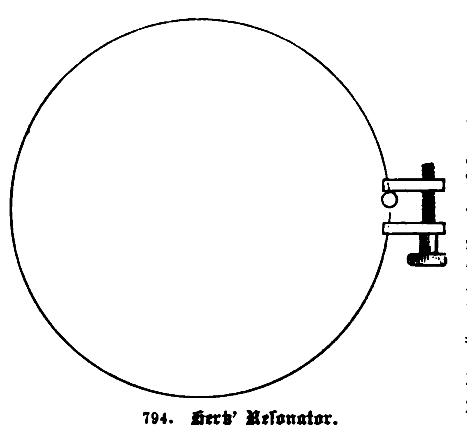
793. Oscillator nach Hertz.

wird, so liefert der Entladungsfunken zwischen den Kugeln a, b Oscillationen, deren Schwingungsdauer etwa Hundertmilliontel einer Sekunde beträgt und um so kleiner ist, je kleiner die Kapazität, also je kleiner die Dimensionen der Metallteile des primären Leiters A a, b B sind. Um nicht zu kleine Schwingungsdauern zu erhalten, kann man die Kapazitäten der geraden Drähte vergrößern, indem man sie mit größeren Kugeln A, B versieht. Diese rasch erfolgenden elektrischen Oscillationen nennt man Hertzsche Schwingungen. Die Schwingungen eines solchen (vertikal gestellten) primären Leiters ließ Hertz sich frei in den Raum ausbreiten und von einer in einer Entfernung von etwa 13 m gegenübergestellten vertikalen Metallwand reflektieren; es bilden sich dann durch Interferenz der direkten und der reflektierten Wellen zwischen dem primären Leiter und der Metallwand stehende elektrische Wellen, d. h. an bestimmten Stellen, den Schwingungsknoten, ist keine elektrische Kraft bemerkbar, an anderen bestimmten Stellen, den Schwingungsbäuchen, ist die elektrische Kraft am stärksten; von einem

Knoten bis zum Bauche nimmt sie beständig zu, um dann wieder bis zum nächsten Knoten auf Null herabzusinken. Die elektrischen Vorgänge spielen sich wesentlich im Isolator ab, die Leiter bilden nur undurchlässige Begrenzungen des Mediums, welches die elektrischen Schwingungen vermittelt. Zum Nachweis, daß eine solche Verteilung der elektrischen Kraft thatsächlich stattfindet, mußte Hertz, da wir ein Organ zu ihrer Wahrnehmung nicht besitzen, ein besonderes Instrument ersinnen, den elektrischen Resonator oder sekundären Leiter, d. i. ein einfacher gerader oder kreisförmiger Draht mit einer feinen, mikrometrisch verstellbaren Funkenstrecke (Abb. 794). Im Wellengebiet des primären Leiters werden auch in dem sekundären Leiter Schwingungen induziert, die sich durch den Übergang von Fünkchen bemerkbar machen, welche am stärksten in der Nähe der Schwingungsbäuche, am schwächsten in der Nähe der Schwingungsknoten auftreten. Freilich wird die Stärke der elektrischen Resonanz wesentlich durch die Form und die Größe des sekundären Leiters bedingt sein; er muß auf den primären Leiter abgestimmt sein, gleichwie in der Akustik ein Resonator auf einen bestimmten Ton abgestimmt sein muß, um durch Resonanz die größte Verstärkung desselben hervorzubringen. Mit einem solchen vertikal und senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Wellen stehenden, elektrischen Resonator untersuchte Hertz das elektrische Feld und fand, daß in der Nähe der Metallwand die Funken ausblieben, daß sie in einiger Entfernung von ihr auftraten und mit zunehmender Entfernung immer stärker wurden, bis sie an einer bestimmten Stelle ein Maximum erreichten, um dann wieder bis zu einer bestimmten Stelle bis Null abzunehmen. Für die Entfernung zweier Knotenpunkte und zweier Schwingungsbäuche, d. i. also für die halbe Wellenlänge, ergab sich im Mittel 4,8 m. Die Schwingungsdauer einer Oscillation berechnete sich aus den Dimensionen zu 3,1 Hundertmilliontel Sekunde: hieraus folgt als Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$= \frac{9,6 \text{ m}}{3,1 \text{ Hundertmilliontel Sekunde}} = 310000 \text{ km}$$

pro Sekunde, ein Wert, der mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts übereinstimmt.

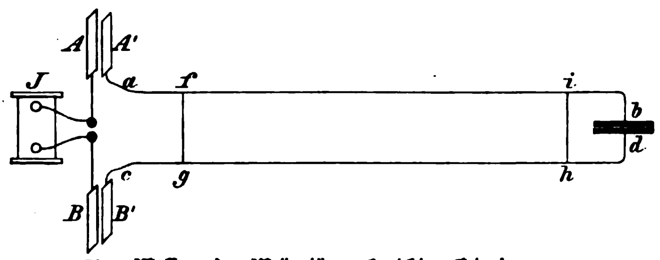

794. Hertz' Resonator.

Man hat seitdem die Hertzsche Versuchsordnung mannigfach modifiziert und besonders für die objektive Darstellung, da die Fünkchen winzig klein und nur im Dunkeln und schwer zu sehen sind, die Funkenstrecke ersetzt durch ein Froschpräparat, oder andere Energiemesser für die Hertzschen Schwingungen mit Erfolg angewendet, z. B. eine Geißlersche Röhre, ein empfindliches Elektroskop, ein Thermoelement, ein Bolometer. Eine recht bequeme und einfache Versuchsanordnung zur Messung der Wellenlänge Hertzscher Schwingungen ist die von Lecher angegebene:

Von der sekundären Spirale eines kräftigen Induktionsapparats J (Abb. 795) führen zwei kurze Drähte zum primären Leiter, welcher aus zwei quadratischen Metallplatten A, B von 40 cm Seitenlänge und einem geradlinigen, 100 cm langen Verbindungsdraht besteht, der in seiner Mitte durch eine etwa 0,75 cm lange Funkenstrecke unterbrochen ist, in welcher durch die Entladungen des Induktoriums die Schwingungen eingeleitet werden. Der Durchmesser der Kugel beträgt etwa 3 cm. Den Platten A, B stehen in einer Entfernung von 4 cm zwei gleich große Platten A′, B′ gegenüber, von welchen lange (mindestens 6 m lange) Kupferdrähte a b und c d ausgehen, die parallel, etwa 30 cm von einander entfernt, gut isoliert entweder frei in der Luft oder an kleinen Kondensatorplatten von etwa 20 cm Durchmesser endigen. In der Nähe der Enden befindet sich eine Geißlersche Röhre mit oder ohne Elektroden. Werden nun die Schwingungen in dem primären Leiter zwischen A und B erregt, so entstehen durch Influenz auch in den gegenüberstehenden Platten Schwingungen, welche sich im Luftraum längs der parallelen Drähte fortpflanzen und

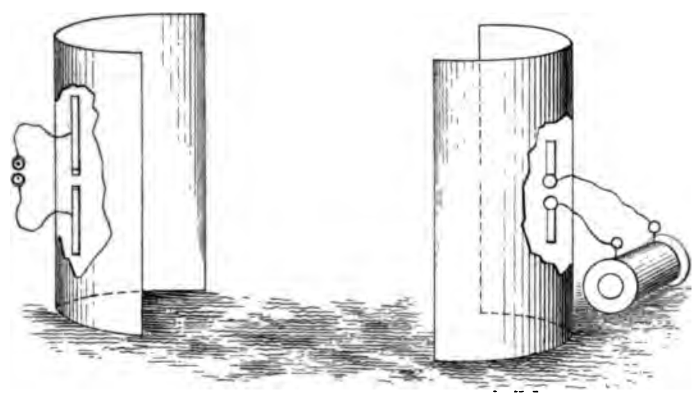
die Geißlersche Röhre zum Aufleuchten bringen. Werden jetzt die parallelen Drähte durch einen Querdraht (einen mit einem isolierenden Griff versehenen Drahtbügel) f g überbrückt, so hört das Leuchten der Röhre im allgemeinen auf; verschiebt man den Querdraht längs der parallelen Drähte, so findet man bestimmte, scharf zu beobachtende Stellen, bei deren Überbrückung die Röhre plötzlich wieder aufleuchtet. Die Lage dieser Stellen ist unter sonst gleichen Umständen abhängig von der Kapazität des Kondensators.

Bei genügend langen Drähten können zwei Stellen f g und i h bestimmt werden derart, daß, wenn sie gleichzeitig überbrückt werden, die Röhre aufleuchtet. Die beiden Stromkreise f i h g und i b d h sind alsdann in Resonanz, und die Gesamtlänge des Stromkreises f i h g ergibt die Wellenlänge der in letzterem verlaufenden Schwingungen. Aus der beobachteten Wellenlänge und der berechneten Schwingungsdauer ergab sich wieder die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Schwingungen im Drahte fortpflanzen, übereinstimmend mit der Lichtgeschwindigkeit.



795. Messung der Wellenlänge Hertzscher Schwingungen.

Da nun die enorme Größe der letzteren zu der Annahme führt, daß der Träger der Lichtbewegung ein äußerst feines elastisches Medium, der Äther sei, so führen die Hertzschen Versuche zu dem Schluß, daß auch die elektrischen Wellen durch den Äther fortgepflanzt werden, daß Licht- und elektrische Wellen Schwingungen des Äthers sind, die sich nur durch die Größe ihrer Wellenlänge von einander unterscheiden. Wenn dies aber richtig ist, so müssen die elektrischen Wellen dieselben Erscheinungen zeigen wie die Lichtwellen, sie müssen den Gesetzen der Reflexion, der Brechung, der Polarisation folgen. Auch dies hat Hertz durch seinen berühmten Spiegelversuch auf das glänzendste bewiesen. Er stellte den primären Leiter in die Brennlinie eines vertikalen, parabolischen Hohlspiegels (Abb. 796) auf, der von den Zuleitungsdrähten zum primären Leiter durchsetzt wird; dadurch werden die elektrischen Strahlen zusammengehalten und wirken kräftiger und bis auf größere Entfernungen auf einen Resonator, als ohne den Spiegel. Durch Drehen desselben kann man die elektrischen Strahlen nach verschiedenen Richtungen leiten, und indem man diese mit dem Resonator aufsucht, die geradlinige Ausbreitung der Strahlen nachweisen. Bringt man den Resonator in die Brennlinie eines zweiten, vertikal und konaxial zum ersten aufgestellten Spiegels, so kann man die Wirkung leicht bis auf das fünffache der vorigen Entfernung verfolgen. Wird ein leitender Körper, z. B. ein Metallschirm oder auch der menschliche Körper, in den Gang der Strahlen gestellt, so erlischt der Resonator; die leitenden Körper werfen Schatten. Dabei werden aber die elektrischen Strahlen von dem zwischengestellten leitenden Körper nicht absorbiert, sondern zurückgeworfen. Stellt man die Hohlspiegel so auf, daß ihre Achsen sich unter einem Winkel von 90° kreuzen, so erlischt der Resonator. Stellt man aber in den Kreuzungspunkt der


797. Hertzscher Spiegelversuch.

Achsen einen ebenen, vertikalen Metallschirm oder ein aus parallelen, vertikalen Drähten bestehendes Gitter so auf, daß seine Ebene mit den Achsen Winkel von 45 Grad bildet, so treten wieder Fünkchen im Resonator auf.

Auch die Brechung der elektrischen Strahlen läßt sich mit Hilfe eines den Dimensionen der Wellen entsprechenden, großen Prismas aus Pech oder Asphalt oder Paraffin zeigen, und man kann die Richtung der gebrochenen Strahlen mittels des Brechungsgesetzes und der Dielektrizitätskonstante (vergl. S. 509) der brechenden Substanz berechnen.

Endlich läßt sich auch die Polarisation der elektrischen Strahlen nachweisen. Die Strahlen der primären Schwingung sind ihrer Entstehungsart nach geradlinig polarisiert. Bringt man zwischen die konaxial aufgestellten Hohlspiegel das vorhin erwähnte Drahtgitter, so erlischt der Resonator, wenn die Drähte vertikal stehen, leuchtet aber auf, wenn sie horizontal stehen. Dieser Versuch bildet eine gewisse Analogie zu dem in der Optik (S. 285) beschriebenen Versuch mit der Turmalinplatte.

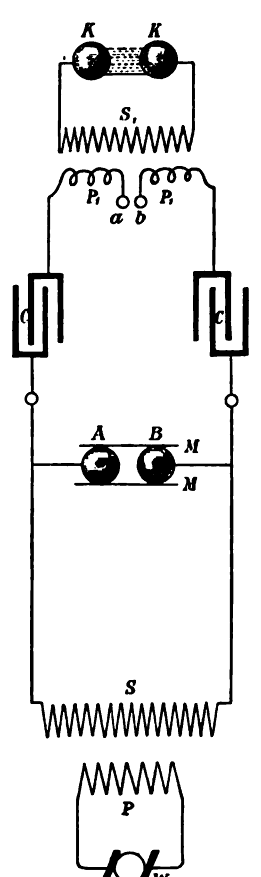


797. Nicola Tesla.

Durch diese mit schöpferischer Phantasie und bewunderungswürdigem Scharfsinn ausgeführten Versuche hat Hertz der Faraday-Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie, der zufolge das Licht nur eine besondere Art elektrischer Strahlung ist, zum Siege verholfen. Die sichtbaren Ätherwellen bilden nur einen kleinen Bruchteil der beobachteten Ätherwellen. Ihre Wellenlängen liegen etwa zwischen 0,4 und 0,75 μ, umfassen also kaum das Gebiet einer Oktave, während die Ätherwellen, welche für unser Auge zwar nicht sichtbar, aber durch ihre Wärmewirkungen nachweisbar sind, bis zu Wellenlängen von etwa 20 μ beobachtet worden sind, also ein Gebiet von etwa 5 Oktaven umfassen. Elektrische Wellen sind bis zu Wellenlängen von etwa 4 mm beobachtet worden. Sie bilden die Mitte zwischen den akustischen Schwingungen ponderabler Körper und den Lichtschwingungen des Äthers.

Teslas Versuche. Angeregt durch die Hertzschen Entdeckungen und bestrebt, sie praktisch nutzbar zu machen, hat der Elektriker Nicola Tesla sehr interessante Versuche mit Strömen von hoher Wechselzahl und hoher Spannung angestellt, deren überraschende

Ergebnisse überall großes Aufsehen erregten und bestimmt schienen, eine neue Ära der Beleuchtung einzuleiten. Sendet man den Strom einer Wechselstrommaschine durch eine Spirale und nähert dieser eine zweite Spirale, welche eine Glühlampe enthält, so leuchtet letztere schon in einer gewissen Entfernung infolge der Induktionswirkung. Die Wirkung ist um so stärker, je größer die Wechselzahl ist. Denn durch die Schnelligkeit der Zu- und Abnahme des primären Stroms wird nicht nur die Zahl, sondern auch die Stärke der Induktionsströme bedingt. Nun liefert die Entladung einer Leydener Flasche, wie wir gesehen, je nach ihrer Kapazität etwa Hunderttausend bis zu einer Million Oscillationen in der Sekunde. Tesla ladet deshalb eine Leydener Batterie durch eine Wechselstrommaschine und läßt die Entladungsströme durch die primäre Spirale eines Induktoriums (Transformator) gehen. Er erhält daher in dieser starke Ströme von hoher Frequenz. Die primäre Spirale ist von einer sekundären umgeben, die aus sehr vielen Windungen dünnen, auf das sorgfältigste isolierten Drahts besteht. In derselben werden daher Ströme von sehr hoher Spannung und sehr großer Frequenz, sogenannte Hochfrequenzströme erzeugt. Die Teslasche Anordnung ist in Abb. 798 schematisch dargestellt. Durch eine Wechselstrommaschine oder durch einen großen Ruhmkorffschen Induktionsapparat, dessen primäre Spirale P und dessen sekundäre S ist, werden die Leydener Flaschen C, C geladen, indem ihre inneren Belegungen mit den beiden Enden der sekundären Spirale S und die äußeren durch die die Funkenstrecke a b enthaltende sekundäre Spirale P_1 P_1 eines zweiten Induktoriums, des eigentlichen Tesla-Transformators verbunden sind. Die sekundäre Spirale S_1 des letzteren endigt in die beiden Entladungskugeln K K, zwischen denen die Wechselströme von sehr hoher Spannung und Frequenz sich entladen. Die sekundäre Spirale S enthält noch die Funkenstrecke A, B, deren beide Kugeln zu folgendem Zweck mit Glimmerplatten M, M bedeckt sind: Bei Erregung des Induktoriums entsteht zwischen A und B ein Lichtbogen, der die zwischen den Glimmerplatten befindliche Luft erhitzt; infolgedessen steigt zwischen ihnen ein Luftstrom auf, der den Lichtbogen bald nach seinem Entstehen auslöscht. Bei jeder Unterbrechung des Lichtbogens A, B laden sich die Leydener Flaschen und entladen sich bei P_1 P_1, wodurch rasch oscillierende Entladungen zwischen K, K stattfinden, deren Periode einige Hunderttausend pro Sekunde beträgt und durch Verkleinerung der Kapazität des Entladungskreises auf Millionen gesteigert werden kann. Die Windungen der Spiralen des Transformators müssen auf das sorgfältigste isoliert sein; man pflegt sie in Behälter voll Öl zu betten, aus welchem die Luft mittels einer Luftpumpe evakuiert ist. Eine einfachere und zweckmäßige Anordnung ist durch Abb. 799 dargestellt. Die beiden Belegungen der Leydener Flasche werden mit den Enden des (nicht gezeichneten) Induktoriums verbunden und so geladen; die Entladung erfolgt wieder durch die eine Funkenstrecke enthaltende primäre Spirale des Transformators.



798. Teslas Anordnung für Hochfrequenzströme.

Mit Hilfe dieser Anordnung lassen sich nun sehr interessante Erscheinungen, insbesondere die schönsten Lichteffekte hervorbringen. An den Elektrodenkugeln der sekundären Spirale des Transformators finden radial nach allen Seiten ausstrahlende, bläuliche Büschelentladungen statt, ähnlich den Spitzenentladungen einer Elektrisiermaschine, und nähert man die Elektrodenkugeln einander, so erhält man einen aus glänzenden, mehr oder weniger starken Lichtfäden bestehenden Flammenbogen, dessen Form schon durch den Luftzug, den er selbst erzeugt, stark beeinflußt wird, und welcher durch einen Luftstrom angeblasen eine prächtige Lichterscheinung bildet. Befestigt man an die eine Elektrode

einen frei in der Luft endigenden Kupferdraht, so gehen seiner ganzen Länge nach senkrecht zu ihm Büschelentladungen aus, und läßt man ihn in einer beliebigen Form, etwa in der eines Namenzugs auf einer Glasplatte endigen, deren untere mit Stanniol bekleidete Seite mit der anderen Elektrode verbunden ist, so sieht man den Namenszug deutlich in violettem Büschellicht erglänzen. Verbindet man mit den Elektroden zwei Drähte und spannt sie parallel zu einander aus, so erhält man ein prächtiges, den Zwischenraum zwischen ihnen ausfüllendes, violettes Lichtband (Abb. 800); in gleicher Weise erhält man einen schönen, den Zwischenraum zwischen zwei parallelen Drahtkreisen ausfüllenden, violetten Lichtring (Abb. 801).

Eine eigentümliche und auf den ersten Blick sehr überraschende Erscheinung bei solchen Hochfrequenzströmen ist folgende: Verbindet man mit den beiden Elektroden der sekundären Spirale des Transformators einen starken Kupferbügel (Abb. 802), welcher in paralleler Schaltung eine Glühlampe enthält, so leuchtet diese. Die Teslaströme nehmen ihren Weg nicht durch den starken Kupferdraht, sondern durch

Entlader. Öltransformator. Funkenmikrometer. Leydener Flasche.

799. Anordnung für Teslas Versuche.

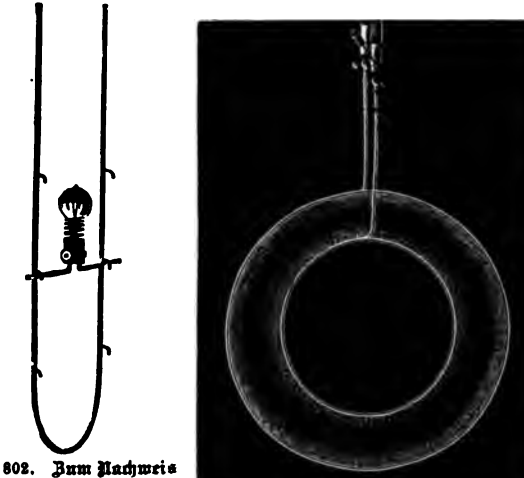
die Glühlampe, obschon der Widerstand derselben ein erheblich größerer ist. Ein gleichgerichteter Strom oder ein Wechselstrom von geringerer Frequenz würde die Lampe nicht zum Glühen bringen. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der Selbstinduktion (vergl. S. 582) des Kupferdrahts, welche sich in einer scheinbaren Widerstandsvergrößerung äußert und dem Entstehen des Stroms entgegenwirkt. Mit der Frequenz der Wechselströme nehmen auch die Extraströme an Stärke zu. Hat die Selbstinduktion des Drahts einen großen Wert, so können die Extraströme den Hauptstrom so schwächen, daß er nicht durch den Draht gehen kann und sich daher einen bequemeren Weg, z. B. durch eine Luftstrecke, sucht. Bei solchen Hochfrequenzströmen kommt es also nicht auf den Widerstand, sondern auf die Selbstinduktion der Strombahn an. Man hat diese Erscheinung Impedanz genannt (von impedire, verhindern).

Eine andere merkwürdige Eigentümlichkeit der Teslaströme ist die, daß sie fast gar keine oder nur sehr geringe physiologische Wirkungen auf den menschlichen Körper ausüben, im Gegensatz zu den Entladungsströmen eines gewöhnlichen Induktoriums. Man kann, ohne Schaden zu nehmen, die Elektroden des Teslatransformators mit der Hand berühren und die Ströme durch den Körper leiten. Die Ursache dieser Erscheinung beruht höchstwahrscheinlich darauf, daß, wie bereits Hertz gezeigt hat, die raschen elektrischen Schwingungen sich nur in sehr dünner Schicht an der Oberfläche der Leiter ausbreiten,

aber nicht in das Innere derselben eindringen. Der französische Physiologe d'Arsonval hat dies durch einen interessanten Versuch experimentell bestätigt, indem er Teslaströme von einer großen Spirale um einen Menschen leitete (Abb. 803). Beim Berühren derselben empfindet man wohl ein schwaches prickelndes Gefühl, sonst ist aber ein Einfluß auf das Nervensystem nicht wahrnehmbar, weil die Ströme nicht ins Innere des menschlichen Körpers eindringen. Daß gleichwohl Ströme induziert werden, die sich an der Körperoberfläche verbreiten, zeigte d'Arsonval dadurch, daß, wenn er den Menschen mit einem Metallgürtel umgab, der eine Glühlampe enthielt, diese zum Glühen gebracht wurde.

Diese Thatsache steht im Einklange mit der Faraday-Maxwell-Hertzschen Anschauungsweise, der zufolge die elektrischen Vorgänge sich in den dielektrischen Medien, in der Luft oder in dem in ihr enthaltenen Äther abspielen und wellenförmig mit der Geschwindigkeit des Lichts ausbreiten, und daß die Leiter dabei nur die Rolle spielen, daß sie die elektrischen Schwingungen zwingen, an ihrer Oberfläche zu bleiben und sich nicht zu zerstreuen. Nach dieser modernen Auffassungsweise vertauschen also gewissermaßen Leiter und Nichtleiter die Rollen, welche ihnen die ältere Theorie bezüglich der Ausbreitung der Elektrizität zuschreibt.

Die praktische Bedeutung der Versuche Teslas besteht aber vorzugsweise darin, daß er erstens gezeigt hat, wie große Mengen elektrischer Energie durch dünne Drähte fortgeleitet werden können, und zweitens darin, daß er gelehrt hat, das Leitungssystem für elektrische Beleuchtung wesentlich zu vereinfachen dadurch, daß man die Rückleitung entbehren, also mit ungeschlossenen Leitungen arbeiten kann. Berührt man eine der Elektroden des Teslatransformators mit einer Geißlerschen Röhre oder bringt sie nur in die Nähe derselben, so leuchtet sie. Verbindet man mit den beiden Elektroden des Transformators zwei große Metallplatten und stellt sie einander gegenüber, so wird zwischen ihnen ein starkes elektrisches Feld gebildet, in welchem freigehaltene Geißlersche Röhren, gleichviel ob mit oder ohne Elektroden, leuchten. Tesla hat diesen interessanten Versuch in großem Maßstabe ausgeführt, indem er zwei große Metallbleche, welche mit den Polen des Transformators verbunden waren, an zwei gegenüberliegenden Wänden eines Zimmers isoliert aufhing und dadurch ein starkes elektrisches Feld erzeugte, welches auf einfachste Weise dadurch erleuchtet werden konnte, daß man an eine beliebige Stelle desselben, ohne jede Drahtverbindung, eine Geißlersche Röhre brachte (Abb. 804).



802. Zum Nachweis der Impedanz bei Hochfrequenzströmen.



801. Lichtring.

800. Lichtband.

Man kann denselben Zweck erreichen, indem man an der Zimmerdecke ein aus mehreren Drähten bestehendes Netz isoliert ausspannt und dasselbe mit der einen Elektrode des Teslatransformators verbindet, während die andere zur Erde abgeleitet wird. Tesla hoffte, nach diesen Prinzipien eine neue elektrische Art der Beleuchtung, „das Licht

der Zukunft", zu verwirklichen, welche sich besonders durch seine Ökonomie gegenüber der gebräuchlichen elektrischen Beleuchtung auszeichnen würde, da bei dieser nur ein sehr kleiner Bruchteil elektrischer Energie in Licht, der größte Teil aber in Wärme umgesetzt wird. Tesla hat auch Lampen konstruiert, denen elektrische Energie nur durch einen Draht zugeführt zu werden braucht. In die Glaswand derselben ist unten ein Draht eingeschmolzen, der sich blind in einen Kohlenfaden fortsetzt, während oben die Glaswand mit Stanniol bekleidet und mit einem Metallreflektor versehen ist. Wird dieser mit einer Elektrode des Transformators verbunden, so erglüht der Kohlenfaden. Statt des letzteren, der häufig sehr schnell zerstäubt, hat Tesla eine beständigere Substanz, das Carborundum, d. i. eine aus Kohlenstoff und Silicium bestehende Verbindung, verwandt. Eine andere Form der Teslalampe ist durch Abb. 805 dargestellt. In den Hals h derselben ist eine Röhre r eingeschmolzen, die in eine Kugel K endigt; der Hals ist mit Stanniol bekleidet, welches mit dem einen Transformatorpol verbunden wird. Die Intensität des von der Lampe gelieferten Lichts ist zwar nur gering; es leuchtet zu schwach, um ohne Schaden längere Zeit bei demselben lesen oder schreiben zu können. Wir sind daher zur Zeit noch von der Verwirklichung der Teslaschen Ideen ziemlich weit entfernt. Seine Versuche sind indessen von höchstem Interesse und von größter Bedeutung, da sie neue Gesichtspunkte und Bahnen der Forschung und der Beleuchtungstechnik eröffnen.



803. d'Arsonvals Versuch über die physiologische Wirkung der Teslaströme.

Zum Schlusse dieses Kapitels wollen wir noch in Kürze eine Erfindung besprechen, welche in jüngster Zeit in der wissenschaftlichen wie technischen Welt ein so berechtigtes Aufsehen erregt hat, und deren Tragweite heute noch nicht übersehen werden kann, nämlich

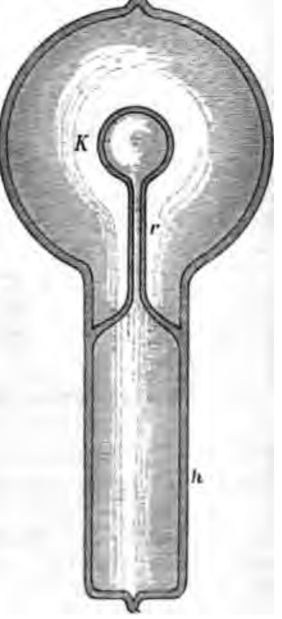
Marconis Erfindung des „Telegraphierens ohne Drähte". Die Grundlage der Versuche Marconis, eines jungen italienischen Ingenieurs, bilden gleichfalls die Hertzschen Entdeckungen. Marconi benutzt als „Geber" auf der einen Station die Hertzschen Schwingungen und zwar in der von Professor Righi gegebenen Anordnung (Abb. 806): Über zwei metallene Vollkugeln von etwa 10 cm Durchmesser ist ein isolierender, mit Vaselinöl gefüllter Cylinder derart geschoben, daß die Kugeln einander nicht berühren und an beiden Seiten mit ihren Hälften herausragen. Nahe an den beiden großen Kugeln befinden sich zwei kleinere, welche mit den Enden der sekundären Spirale eines Induktoriums von etwa 50 mm Schlagweite verbunden sind. So oft der primäre Strom desselben durch den Taster T geschlossen wird, springen zwischen den mittleren und den Endkugeln Funken über, durch welche elektrische Schwingungen (etwa 250 Millionen in der Sekunde) erzeugt werden, deren Fortpflanzung senkrecht zur Verbindungslinie der beiden mittleren Kugeln ist (was durch die punktierten Kurven angedeutet sein möge). Anstatt des Hertzschen

Resonators benutzt Marconi aber einen anderen Apparat von außerordentlicher Empfindlichkeit und Sicherheit im Funktionieren, dessen Prinzip von dem französischen Physiker Branly entdeckt und von dem Engländer Lodge zuerst praktisch verwendet wurde. Er besteht im wesentlichen aus einem mit Metallfeilspänen oder Metallpulver gefüllten Glasröhrchen b, das an seinen beiden Enden mit Zuleitungsdrähten für die Feilspäne versehen ist. Die Platten A, B dienten ursprünglich dazu, die Kapazität, wenn nötig, zu vergrößern. Der elektrische Widerstand des Metallpulvers ist unter gewöhnlichen Verhält-



804. Leuchten einer Geißlerschen Röhre im elektrischen Felde.

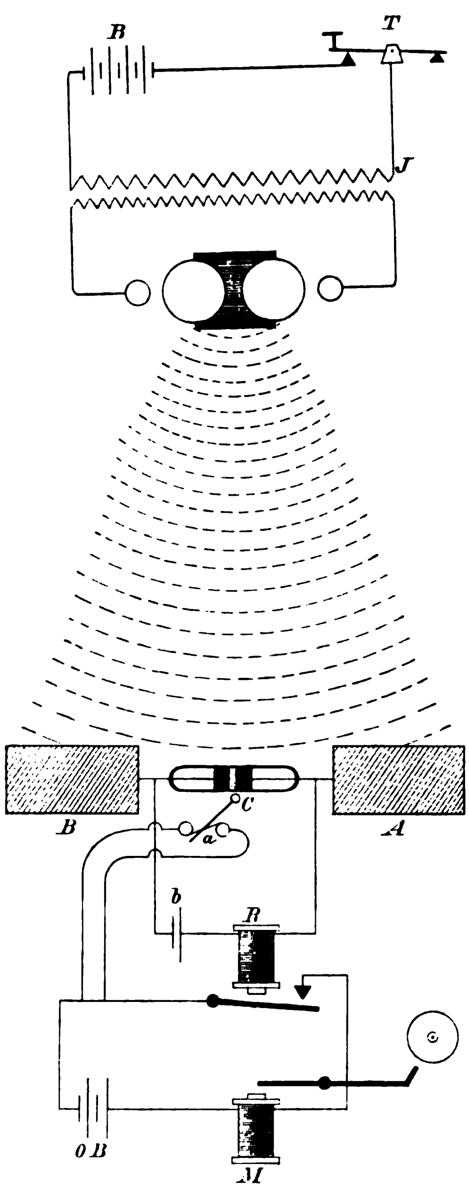
nissen sehr groß. Treffen aber auf das Röhrchen elektrische Strahlen, so werden die Teilchen des Metallpulvers polarisiert, d. h. sie stellen sich zwischen den Elektroden mit ihren Achsen in eine Richtung und haften an einander, wodurch ihr Widerstand außerordentlich vermindert wird, so daß er von Hunderttausenden von Ohm auf wenige Ohm sinkt. Lodge nannte den Apparat wegen dieses unter dem Einfluß elektrischer Strahlen stattfindenden Aneinanderhaftens seiner Teilchen Coherer; die leitende Verbindung bleibt auch nach dem Aufhören der elektrischen Bestrahlung bestehen, der ursprüngliche Zustand des hohen Widerstands muß durch mechanische Erschütterung des Röhrchens bewirkt werden. Marconi schaltet nun einen solchen Coherer C in einen von einer Batterie b und einem empfindlichen Relais R gebildeten Stromkreis (Abb. 806). Durch das Relais kann ein zweiter Stromkreis, der eine zweite Batterie, die sogenannte Lokalbatterie, o B und den Morseschreiber M enthält, geschlossen werden. Solange der Coherer nicht von elektrischen Wellen getroffen wird, ist sein Widerstand so groß, daß in dem Stromkreise C b R das Relais R nicht erregt wird. Nach erfolgter Bestrahlung sinkt der Widerstand des Coherer, die Stromstärke steigt, das Relais wird erregt und schließt den den Morseschreiber enthaltenden Lokalstromkreis. In diesen ist noch ein Unterbrecher a mit Klöppel (nach Art einer elektrischen Klingel eingeschaltet, der beim Aufhören der Bestrahlung sanft gegen den Coherer klopft, durch die Erschütterung dessen Widerstand wieder erhöht, wodurch das Relais R ausgelöst und der Lokalstromkreis unterbrochen wird. Dieser Vorgang



805. Teslas elektrische Lampe.

wiederholt sich nun bei erneuter Bestrahlung, und so ist klar, daß man durch unterbrochene, länger oder kürzer andauernde Bestrahlung die Zeichen des Morsealphabets erzeugen kann.

Der Coherer C besteht aus einem etwa 4 cm langen und 2—3 mm breiten, bis auf einen Druck von wenigen Millimetern evakuierten Röhrchen, in welchem sich zwei mit einer Spur Quecksilber amalgamierte Silberelektroden in einer Entfernung von 0,5 mm gegenüber stehen. Der Raum zwischen ihnen ist mit einem Gemisch aus scharfkantigen, spitzigen Metallpulverkörnchen (von etwa 96 % Hartnickel und 4 % Silber) angefüllt.



806. Marconis Anordnung für Funkentelegraphie.

Marconi hat zuerst Versuche in größerem Maßstabe auf Veranlassung der englischen Telegraphenverwaltung mit deren Chefingenieur Preece angestellt und zwischen Penarth und Brean Down über den Bristol-Kanal hinweg auf eine Entfernung von 14,5 km mit gutem Erfolge telegraphiert. Es hatte sich bei diesen Versuchen herausgestellt, daß der Erfolg, insbesondere die Möglichkeit der Überschreitung großer Entfernungen über Klippen, Berge, Wälder, wesentlich bedingt ist durch die Erdverbindungen der Apparate einerseits und durch Benutzung langer, vertikal ausgespannter Drähte andererseits, und zwar in der Weise, daß der eine Pol des Strahlapparats mit einem möglichst langen, vertikal ausgespannten und wohl isolierten Draht versehen und der andere Pol zur Erde abgeleitet, und daß die gleiche Einrichtung am Empfänger angebracht wird. Marconi hat dann mit Unterstützung der italienischen Marine bei Spezzia Versuche ausgeführt und bei dazwischen liegender Insel bis auf 7 km, auf freier See bis auf 18 km telegraphieren können. In Deutschland sind dann in jüngster Zeit von Prof. Slaby*) in größerem Maßstabe Versuche ausgeführt worden, bei denen sich wieder bestätigt hat, daß die Überschreitung weiter Entfernungen über dazwischen liegende, störende Hindernisse durch Anwendung möglichst langer, und zwar gleich langer, vertikal ausgespannter und gut isolierter Luftdrähte ermöglicht wird. Prof. Slaby hat auf den Havelseen bei Potsdam bei Anwendung von 26 m langen Luftdrähten bis auf eine Entfernung von 1,6 km, bei einer Länge derselben von 65 m über Hindernisse hinweg auf eine

*) Derselbe hat vorgeschlagen, die früher übliche Bezeichnung „Telegraphie ohne Draht" durch „Funkentelegraphie" zu ersetzen und statt des unschön klingenden Worts „Coherer" auf den Rat von Prof. Reuleaux den Ausdruck „Fritter" oder „Frittröhre" zu gebrauchen. „Fritten" bedeutet nämlich in der Technik einen Vorgang, bei welchem lose zusammenhängende, pulverförmige Substanzen durch oberflächliche Schmelzung zum Aneinanderhaften gebracht werden.

Entfernung von 3,1 km und endlich bei Versuchen, welche von ihm mit Unterstützung der Luftschifferabteilung bei Berlin über freies Feld hinweg angestellt worden sind, mit 300 m langen Luftdrähten, bis auf eine Entfernung von 21 km mit Sicherheit telegraphieren können, so daß auch diese geistvolle neueste praktische Verwertung der Hertzschen Entdeckung zu den schönsten Hoffnungen, besonders für maritime und militärische Zwecke, berechtigt.

Durchgang der Elektrizität durch verdünnte Gase. Kathodenstrahlen. Röntgenstrahlen.

Läßt man die Entladungen einer Elektrisiermaschine oder eines Funkeninduktors anstatt in gewöhnlicher Luft in verdünnter vor sich gehen, z. B. zwischen den Kugeln des sogenannten elektrischen Eis (Abb. 807), so vergrößert sich die Schlagweite mit fortgesetzter Verdünnung, bis bei einem Quecksilberdruck von etwa 7 mm die knallenden Funkenentladungen aufhören und ein Strom rosafarbenen Lichts, welches vom Stickstoff der Luft herrührt, das Ei erfüllt. Jede verdünnte Gasart leuchtet in einer bestimmten, ihr eigentümlichen Farbe und zeigt durch ein Prisma zerlegt ein bestimmtes, für sie charakteristisches Spektrum. Wir haben im Abschnitt „Vom Licht" (S. 319) gesehen, in welcher Weise man die Spektren von Gasen und Dämpfen mittels der Vakuum- oder Geißlerschen Röhren untersuchen kann. Die Entladungserscheinungen in Vakuumröhren sind zuerst von dem französischen Physiker Gassiot (1854) und bald darauf in umfangreicher Weise von dem deutschen Physiker Plücker in Bonn studiert worden. Bei einer Verdünnung von etwa 1—2 mm zeigt sich, wie zuerst Grove und nach ihm Ruhmkorff beobachtet hat, das Licht geschichtet, d. h. das zwischen den Elektroden übergehende und die ganze Röhre ausfüllende violett- und rosafarbene Licht ist durch dunkle, auf der Entladungsrichtung senkrechte Zwischenräume (Abb. 808) von einander getrennt, deren Anzahl mit steigender Verdünnung abnimmt. Weiter zeigt sich, daß die (bei Luft in violettem Lichte) leuchtende Entladung von der Spitze der positiven Elektrode (Anode) ausgeht und sich durch die ganze Röhre, wie auch deren Form sei, bis nahe an die negative Elektrode (Kathode) erstreckt, von ihr aber stets durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist, während die Kathode selbst ihrer ganzen Länge nach von einem bläulichen Lichtsaume, dem negativen Glimmlicht, umgeben ist. Jener dunkle Zwischenraum erweitert sich bei fortgesetzter Verdünnung nach der Anode hin, so daß deren Licht allmählich auf einen immer kleiner und kleiner werdenden Raum zurückgedrängt wird. Man kann die Verdünnung so weit treiben, bis nur noch ein minimaler Rest positiven Elektrodenlichts vorhanden ist, und der dunkle Zwischenraum von der Kathode aus nahezu die ganze Röhre ausfüllt. Bei so hohem Grade der Verdünnung gehen nun, wie zuerst Hittorf in Münster beobachtet hat, von der Kathode Strahlen aus, die sogenannten Kathodenstrahlen, welche die eigentümliche Fähigkeit besitzen, die Glaswand, wo sie sie treffen, zum Fluorescieren in gelblich grünem Lichte zu bringen. Diese Kathodenstrahlen, mit denen sich nach Hittorf in eingehendster Weise in England Crookes, in Deutschland die Physiker Goldstein, E. Wiedemann, Ebert, Hertz, Lenard u. a. beschäftigt haben, haben in neuerer Zeit seit Röntgens Entdeckung eine besondere Wichtigkeit und ein erhöhtes Interesse gewonnen, so daß wir einige ihrer Eigenschaften betrachten wollen. Zunächst treten sie, wie bemerkt, nur auf, wenn die Verdünnung einen außerordentlich hohen Grad, etwa 0,001 mm Druck, erreicht hat. Sie pflanzen sich geradlinig und senkrecht zur Kathodenfläche fort. Dies läßt sich in eklatanter Weise mittels der in Abb. 809 dargestellten, von Crookes konstruierten Röhre zeigen. Die von der Kathode a ausgehenden Strahlen erregen die ihr gegenüberliegende Glaswand, überall wo sie sie treffen, zu leuchtender Fluorescenz. Wird nun den Kathodenstrahlen ein



807. Elektrisches Ei.

undurchsichtiger Körper, z. B. ein Platinkreuz, in den Weg gestellt, so werden sie durch das Kreuz abgefangen, und dieses wirft einen scharfen Schatten auf die Glaswand, so daß wir auf ihr ein dunkles Kreuz auf gelblich grünem Grunde erblicken. Wählt man als Kathode einen sphärisch gekrümmten Platinspiegel (Abb. 810, rechts), so werden die senkrecht von ihm ausgehenden Kathodenstrahlen, gleichviel welche der drei mit + bezeichneten Elektroden man als Anode wählt, in seinem Brennpunkt vereinigt und gehen dann wieder auseinander. Wählt man umgekehrt den Platinspiegel als Anode, so erhält man die durch die linke Seite der Abbildung dargestellte Lichterscheinung. Ein im Brennpunkt angebrachtes Metallblech wird durch die Kathodenstrahlen bis zum Glühen erhitzt und kann bei hinreichend starkem





808. Die Erscheinung „geschichteten" Lichts.



809. Crookessche Röhre.

Strom zum Schmelzen gebracht werden (Abb. 811). Auch die von den Kathodenstrahlen getroffenen Stellen der Glaswand werden stark erwärmt und können so heiß werden, daß sie erweichen und infolge des äußeren Luftdrucks durchbrochen werden. Nicht nur



810. Brennpunkt von Kathodenstrahlen.



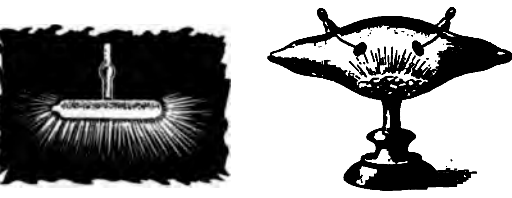
811. Wärmewirkung der Kathodenstrahlen.



812. Fluorescenzerregung durch Kathodenstrahlen.

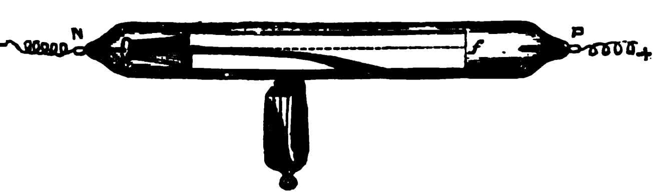
die Glaswände der Vakuumröhre, sondern auch die verschiedensten Mineralien im Innern derselben werden, wenn sie von Kathodenstrahlen getroffen werden, zum Fluorescieren gebracht. Crookes hat Röhren, die Stücke von Doppelspat, Galmey, Kreide, Kieselzink, Koralle, Marmor u. s. w. enthalten, konstruiert (Abb. 812), welche von Kathodenstrahlen

getroffen in den verschiedensten, der Natur der Substanz entsprechenden Farben fluorescieren und glänzende und prachtvolle Lichteffekte gewähren. Ganz besonders zeichnet sich in dieser Beziehung die Sidotsche Blende aus, welche eine prachtvoll leuchtende, hellgrüne Phosphorescenz von höchster Lichtstärke liefert. Abb. 813 u. 814 zeigen zwei Vakuumröhren mit Sidotscher Blende, die eine ohne, die andere mit Elektroden.

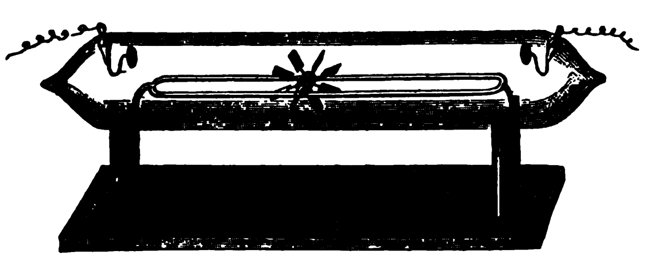


813 u. 814. Vakuumröhren mit Sidotscher Blende.

Eine weitere Eigenschaft der Kathodenstrahlen ist ihre Ablenkbarkeit durch den Magnet. Bewegt man einen Magnet in der Nähe der von den Kathodenstrahlen getroffenen Glaswand einer Vakuumröhre, so folgt der Fluorescenzfleck den Bewegungen des Magnets (Abb. 815). Heinrich Hertz hat gefunden, daß man verschiedene Arten von Kathodenstrahlen unterscheiden kann, die vom Magnet verschieden stark abgelenkt werden, ähnlich wie Lichtstrahlen verschiedener Farbe verschieden stark durch das Prisma abgelenkt werden. Auch elektrostatische Einflüsse, z. B. Berührung mit dem Finger und Bewegung längs der Vakuumröhre, bringen eine Ablenkung der Kathodenstrahlen hervor. Daß Kathodenstrahlen auch mechanische Bewegungen hervorrufen können, läßt sich mittels der in Abb. 816 dargestellten Crookesschen Röhre zeigen, in welcher ein leicht bewegliches Flügelrädchen, wenn seine Flügel von Kathodenstrahlen getroffen werden, auf zwei parallelen Glasschienen je nach der Richtung der auffallenden Strahlen vor- oder rückwärts bewegt wird.



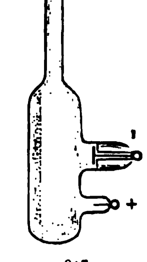
815. Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen durch den Magnet.



816. Crookessche Röhre.

Eine andere interessante von Goldstein gemachte Beobachtung ist die, daß sich unter dem Einflusse von Kathodenstrahlen die Haloidsalze der Alkalimetalle sehr intensiv färben, daß die Färbung aber, wenn man sie einer höheren Temperatur aussetzt, wieder verschwindet. Die Röhre (Abb. 817) ist geeignet, dies zu zeigen; sie enthält reines Chlorkalium oder Chlornatrium, welches durch Kathodenstrahlen beleuchtet eine intensive braune oder violette Färbung annimmt, die bei Erwärmung mittels einer Bunsenflamme wieder verschwindet. Die Ursache der Erscheinung besteht wahrscheinlich in einer photochemischen Zersetzung, indem das negative Chlor entweicht.

Eine Eigenschaft der Kathodenstrahlen endlich, welche den Ausgangspunkt für die neueste, merkwürdigste und wichtigste Entdeckung auf diesem Gebiete bildete, ist wiederum von Heinrich Hertz gefunden worden. Seine schönen, den Kathodenstrahlen gewidmeten experimentellen Untersuchungen haben unter anderem ergeben, daß dünne Metallschichten, welche Lichtstrahlen schon vollständig absorbieren, noch für Kathodenstrahlen durchlässig sein können, während andererseits durchsichtige Substanzen sich als gänzlich undurchdringlich für Kathodenstrahlen erwiesen. Auf Anregung von Hertz hat dann Ph. Lenard kleine, dünne Aluminiumscheiben in die Glaswand von Vakuumröhren eingesetzt, und es gelang ihm, die in der Röhre



817

erzeugten Kathodenstrahlen durch das Aluminiumfenster in die Atmosphäre austreten zu lassen und deren Fortbestehen und Wirkungsweise in derselben nachzuweisen.

Röntgenstrahlen. Soweit waren die Arbeiten gediehen und der wissenschaftlichen Welt bekannt, und wenn wir heute im Besitze der neuen Thatsachen den Entwickelungsgang rückschauend betrachten, so scheint es uns auffallend, daß man mehrere Jahre hindurch jenen Pfad der Forschung so nahe der Fundgrube fast unbeachtet gelassen, bis er 1895 kurz vor der Jahreswende durch einen glücklichen Zufall und günstige Umstände wieder aufgenommen und verfolgt wurde von W. K. Röntgen, durch dessen Scharfblick und experimentelles Geschick uns dann ein neues Forschungsgebiet von ungeahnter Tragweite erschlossen wurde.

In seiner in den Sitzungsberichten der Würzburger physikalisch-medizinischen Gesellschaft im Dezember 1895 zuerst veröffentlichten und seitdem zu so großer Berühmtheit

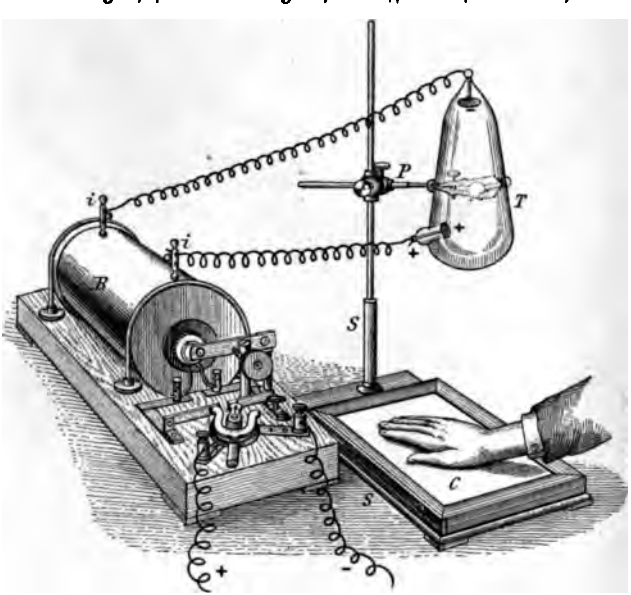


818. Wilhelm Konrad Röntgen,
Professor der Physik an der Universität Würzburg.

gelangten „Vorläufigen Mitteilung“ Über eine neue Art von Strahlen berichtet er uns über seine Entdeckung, die das größte Erstaunen, ja einen geradezu verblüffenden Eindruck nicht nur bei den Physikern, sondern bei allen Gebildeten der ganzen Welt hervorrief. Denn man sollte in das Innere undurchsichtiger Körper hineinblicken, man sollte durch undurchsichtige Körper hindurchschauen können! Er fand, daß, wenn er in einem vollständig verdunkelten Zimmer die Entladungen eines Ruhmkorffschen Induktionsapparats durch eine Vakuumröhre gehen ließ, welche mit einem schwarzen Karton bedeckt war, der keine sichtbaren oder ultravioletten Strahlen des Sonnen- oder des elektrischen Bogenlichts hindurchläßt, ein mehrere Meter weit von der Vakuumröhre befindlicher, mit Baryumplatincyanür angestrichener Papierschirm bei jeder Entladung hell aufleuchtete, fluorescierte. Dasselbe findet statt, wenn zwischen den Schirm und den schwarzen Karton ein 1000 Seiten starkes Buch, ein mehrere Zentimeter dickes Brett, eine dicke Ebonitplatte gehalten werden. Jene von der Vakuumröhre ausgehenden unsichtbaren „Strahlen“ — Röntgen schlägt für sie die Bezeichnung X-Strahlen vor, jetzt nennt man sie allgemein Röntgenstrahlen — gehen durch Papier, Pappe, durch Ebonit, durch Kohle, besonders aber durch Holz so ungehindert hindurch, wie gewöhnliches Licht durch Glas. Als Haupt-

ausgangsstelle der nach allen Richtungen sich ausbreitenden Röntgenstrahlen ist die am stärksten fluorescierende, d. i. die von den Kathodenstrahlen getroffene Stelle, der Glaswand der Vakuumröhre zu betrachten. Lenkt man die Kathodenstrahlen innerhalb der Vakuumröhre durch einen Magnet auf eine andere Stelle ab, so bildet diese den Ausgangspunkt für die Röntgenstrahlen. Auch die Metalle, z. B. Aluminium, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Zinn, Zink, Blei sind in dünnen Schichten für die Röntgenstrahlen durchlässig, Aluminium am meisten, Blei am wenigsten. Mit zunehmender Dicke werden alle Körper weniger durchlässig, bei gleicher Schichtendicke ist die Durchlässigkeit der verschiedenen Körper im allgemeinen wesentlich bedingt durch ihre Dichte; indessen ist diese allein nicht maßgebend. Von vier gleich dicken Platten aus Aluminium, Glas, Quarz und Kalkspat, welche das gleiche spezifische Gewicht hatten, erwies sich die Kalkspatplatte beträchtlich weniger durchlässig als die anderen drei Platten, welche nahezu gleiche Durchlässigkeit zeigten.

Außer dem Baryumplatincyanür werden auch andere Substanzen, z. B. die als Phosphor bekannten Calciumverbindungen, ferner Uranglas, Kalkspat u. s. w. durch Einwirkungen von Röntgenstrahlen zum Fluorescieren gebracht. Von ganz besonderer Bedeutung ist aber die Thatsache, daß photographische Trockenplatten sich als empfindlich gegen Röntgenstrahlen erwiesen haben. Denn da diese durch Papier und durch Holz ungehindert hindurchgehen, so kann eine in schwarzer Papierumhüllung oder in einer Kassette eingeschlossene photographische Platte in unverdunkeltem Zimmer durch Röntgenstrahlen belichtet werden, und es können so photographische Aufnahmen gemacht, d. h. von Gegenständen, die zwischen die Platte und die Vakuumröhre gebracht werden, können Schattenbilder entworfen und, wenn man die Platte in gewöhnlicher Weise entwickelt, fixiert werden. Dabei kommt die vorhin erwähnte Eigenschaft sehr zu statten, daß die Durchlässigkeit der Strahlen wesentlich durch die Dichte der Körper bedingt ist, und daß daher Unterschiede in der Dichte einzelner Teile eines abgebildeten Gegenstandes auch Unterschiede in der Durchlässigkeit zeigen. Denn nur dadurch gelang es z. B. Röntgen, Photographieen zu gewinnen: von den Schatten der Profile einer Thür, welche zwei Zimmer trennte, in denen einerseits der Entladungsapparat, andererseits die photographische Platte aufgestellt war, von den Schatten eines in einem Holzkästchen eingeschlossenen Gewichtsatzes, eines auf einer Holzspule versteckt aufgewickelten Drahts, von dem Schatten eines Metallstücks, dessen Inhomogenität durch die X-Strahlen bemerkbar ward, von den Schatten der Knochen einer Hand, die wegen ihrer geringeren Durchlässigkeit erheblich dunkler erscheinen als die Schatten der durchlässigeren Weichteile der Hand.



819.
Photographische Aufnahme einer Hand mittels Röntgenstrahlen.

Abb. 819 stellt die einfache Versuchsanordnung zur Aufnahme einer Hand dar. Diese liegt auf der verschlossenen Kassette, welche die photographische Platte (die empfindliche Schicht nach oben gerichtet) enthält. Darüber befindet sich die Vakuumröhre, welche mit der sekundären Spirale des Induktoriums derartig verbunden ist, daß ihre untere

Glasfläche von den Kathodenstrahlen getroffen wird und demnach die Ausgangsstelle für die auf die Hand treffenden X-Strahlen bildet.

Der Gedanke und der Versuch Röntgens, gerade die menschliche Hand abzubilden, ist einer der glücklichsten und fruchtbringendsten geworden. Wer weiß, ob ohne diesen Versuch seine Entdeckung das allgemeine Interesse und die ungeheure Popularität gewonnen hätte, deren sie sich mit Recht sofort erfreute und heute noch in unvermindertem Maße erfreut! In allen physikalischen, elektrotechnischen und physiologischen Instituten, in allen Kliniken, an allen Schulen war man mit dem größten Eifer bestrebt, die Versuche zu wiederholen, und nicht nur die wissenschaftlichen Zeitschriften, auch alle politischen in- und ausländischen Tagesblätter brachten täglich Aufsätze, Notizen und Depeschen, ob und wo ein Versuch mit den X-Strahlen geglückt war, und die gebildete Welt erwartete und verfolgte täglich die Nachrichten mit gespanntester Aufmerksamkeit. Die Ursache, warum in der allerersten Zeit die Versuche vielfach kein befriedigendes Resultat ergaben, lag in der Schwierigkeit, geeignete Vakuumröhren zu erhalten. Die Nachfrage nach solchen und nach Fluorescenzschirmen trat zu plötzlich und zu vielseitig auf, um sofort befriedigt werden zu können. Bald aber traf Nachricht auf Nachricht ein, die die Röntgenschen Versuche aufs glänzendste bestätigten.



820. Röntgen-Aufnahme einer Kinderspielschachtel.

Abb. 820 zeigt die Aufnahme eines in einer hölzernen Kinderspielschachtel verschlossenen reitenden Artilleristen aus Metall, Abb. 821 die eines Huhns, Abb. 822 rechts die Aufnahme der rechten, normalen Hand (mit Ring auf dem Mittelfinger) eines elfjährigen Mädchens, an der man deutlich die einzelnen Handwurzel- und Mittelhandknochen, sowie die Fingerglieder erkennt, links die von Geburt verkrüppelte, linke Hand desselben Mädchens, an der man zunächst mehrere Handwurzelknochen vermißt und nur einen verbreiterten Mittelhandknochen sieht, der durch Gelenke zugleich mit den Fingergliedern des Daumens und des Zeigefingers in Verbindung steht.

Röntgen hat sich nicht darauf beschränkt, die Durchlässigkeit der X-Strahlen für die verschiedensten Körper zu untersuchen, sondern hat auch ihre anderen physikalischen Eigenschaften im Vergleich mit denen gewöhnlicher Lichtstrahlen eingehend studiert. Zunächst suchte er festzustellen, ob dieselben durch ein Prisma abgelenkt werden. Versuche mit Wasser und mit Schwefelkohlenstoff in Glimmerprismen von 30° brechendem Winkel ergaben ein durchaus negatives Resultat; durch Prismen aus Hartgummi und aus Aluminium erhielt er zwar auf der photographischen Platte eine kleine Ablenkung, indessen hält er dieselbe für nicht ganz sicher und schätzt, wenn eine prismatische Ablenkung überhaupt vorhanden ist, den Brechungsexponenten der X-Strahlen in diesen Substanzen

auf höchstens 1,06. Hieraus ergibt sich sofort, daß die X-Strahlen sich nicht durch Linsen konzentrieren lassen, was auch der Versuch mit einer Hartgummi- und mit einer Glaslinse bestätigte. Des Weiteren fand Röntgen, daß eine merkliche, regelmäßige Reflexion der X-Strahlen nicht stattfindet, und daß die Körper den X-Strahlen gegenüber sich ähnlich verhalten, wie trübe Medien dem Lichte gegenüber. Interferenzerscheinungen ließen sich auch nicht an X-Strahlen nachweisen, ebensowenig Polarisationserscheinungen. Ferner werden sie durch den Magnet nicht abgelenkt, während dies bei den Kathodenstrahlen mehr oder minder der Fall ist. Aus diesem Verhalten und den erwähnten negativen Eigenschaften gelangt Röntgen zu der Ansicht, daß die X-Strahlen nicht identisch mit den ultravioletten und auch nicht identisch mit den Kathodenstrahlen sind, daß sie aber von letzteren in der Glaswand und auch in Metallen der Vakuumröhre erzeugt werden, und er spricht die Vermutung aus, daß sie vielleicht, während das gewöhnliche Licht in Transversalschwingungen des Äthers besteht, longitudinalen Schwingungen im Äther zuzuschreiben seien, die in der Fortpflanzungsrichtung stattfinden, ähnlich wie die Schallschwingungen in der Luft.



821. Röntgenphotographie eines Huhns.

Seit dem Bekanntwerden der Röntgenstrahlen sind unzählige Arbeiten über dieselben ausgeführt und veröffentlicht worden; eine gewaltige Litteratur dieses Gebietes ist entstanden, und mehrfach sind Zeitschriften gegründet worden, welche ausschließlich diesen Wissenszweig behandeln. Und doch ist das, was wir heute über die Eigenschaften und das Wesen der Röntgenstrahlen wissen, nicht viel mehr, als was Röntgen bereits in seiner ersten Arbeit uns mitgeteilt hat. Nur in der Technik des Röntgenverfahrens, in der praktischen Verwendung der Röntgenstrahlen, sei es mittels des Fluorescenzschirms, sei es auf photographischem Wege, sind durch das gemeinsame Arbeiten und die verschiedenen Bedürfnisse der Physiker, Chemiker, Ärzte, Elektrotechniker, Photographen und Glaskünstler wesentliche Vervollkommnungen und Fortschritte der Instrumente und Apparate zu verzeichnen.

Das größte Interesse an der praktischen Verwertung der Röntgenstrahlen hat von Anfang an naturgemäß die Medizin gezeigt; sie hat auch bisher die besten Erfolge gehabt und zwar nicht nur für chirurgisch-diagnostische Zwecke, um Fremdkörper, Geschosse u. s. w. im menschlichen Körper aufzufinden, sondern auch für die innere Medizin, seitdem es gelungen ist, deutliche Bilder der inneren Organe, des Zwerchfells, der Leber, der Lunge, des Herzens und größerer oder kleinerer Teile des Magens, je nach dem Luftfüllungszustand derselben zu erhalten, die Bewegungen des Zwerchfells bei der Atmung und des Herzens in seiner rastlosen Thätigkeit zu verfolgen, sowie pathologische Zustände innerer Organe, Verkalkungen der Aorta, in der Lunge u. s. w. nachzuweisen. Demgemäß sind heute die besseren Krankenhäuser mit Röntgeneinrichtungen ausgerüstet, und

seitens der Regierung sind Staatsinstitute für Röntgenuntersuchungen eingerichtet worden, welche in enger Beziehung zu den klinischen Instituten der Universitäten stehen.

Wir wollen in Kürze die erforderlichen Instrumente und Apparate für solche Untersuchungen besprechen.

Was zunächst die Funkeninduktoren zur Erregung der Vakuumröhre anbelangt, so genügen die auf Seite 584 und 585 beschriebenen Typen den weitgehendsten Ansprüchen: Schlagweiten von 100 cm werden nur in seltenen Fällen erfordert werden; bei dem gegenwärtigen Stand der Fabrikation der Vakuumröhren genügen in der Regel Funkeninduktoren mit 50 und meistens auch schon mit 20—25 cm Funkenlänge vollständig, sowohl für die direkte Durchleuchtung wie für die photographische Aufnahme. Von besonderer Wichtigkeit zur Erzielung eines deutlichen, scharfen Bildes ist ein ruhiger, gleichmäßiger und schneller Gang des Unterbrechers für den primären Strom. Für photographische Aufnahmen eignet sich der Betrieb des Induktors mittels des Quecksilberunterbrechers mit Elektromotor (vergl. S. 585), bei welchem etwaige Schwankungen in der Tourenzahl, die durch Nachlassen der Spannung oder durch Reibung irgend welcher Art veranlaßt werden könnten, und die auf die Expositionsdauer von Einfluß sind, sofort durch das Tachymeter angezeigt werden. Für Durchleuchtung ist vielfach die Anwendung des Deprezschen Unterbrechers beliebt, der infolge sehr rascher Unterbrechungen ein recht gleichmäßiges Licht liefert. Er ist durch Abb. 823 dargestellt. Das eine Ende eines um die Achse O drehbaren Plättchens E aus weichem Eisen steht als Anker dem Eisenbündel der primären Spirale gegenüber und wird, wenn das Eisenbündel magnetisch wird, von diesem angezogen; dadurch wird der durch die Schraube S_1 und das Eisenstück zur Spirale geführte primäre Strom bei Q unterbrochen, während der Kontakt wieder hergestellt wird durch eine starke Feder, die durch Schraube S_2 stärker oder schwächer gespannt wird.



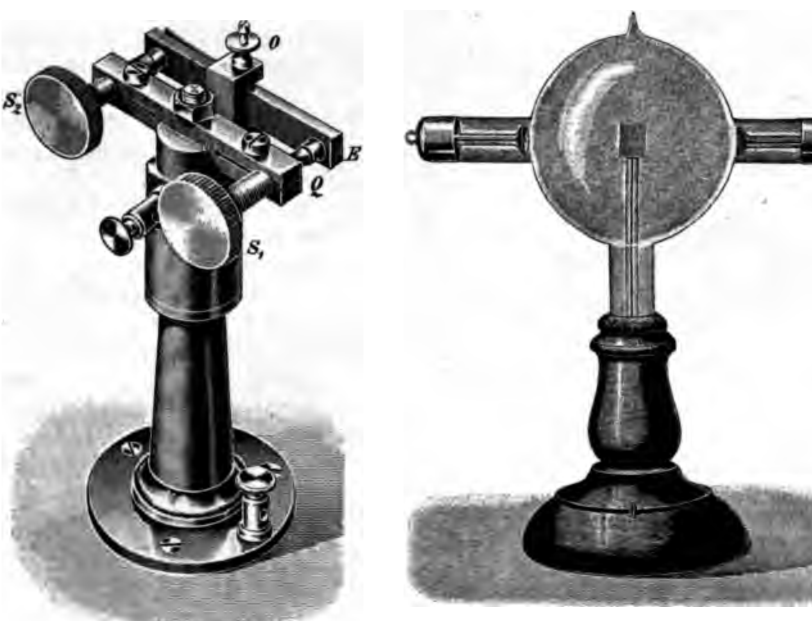
822. Röntgenphotographie einer normalen Hand mit Ring und einer verkrüppelten Hand.

Von größter Bedeutung aber für Erzielung guter Bilder und Aufnahmen ist die Vakuumröhre, die deshalb auch in den letzten zwei Jahren mannigfache Modifikationen und Verbesserungen erfahren hat. Es hat sich als zweckmäßig herausgestellt, nicht die Röhrenwand, sondern ein im Innern der Röhre befindliches Platinblech als Ausgangsstelle für die Röntgenstrahlen zu wählen, nachdem schon Röntgen gezeigt hatte, daß ein solches zur Fluorescenz erregt wird und Röntgenstrahlen auszusenden im stande ist, wenn es von Kathodenstrahlen getroffen wird. Ferner ist es zur Erzielung scharfer photographischer Bilder zweckmäßig, die Röntgenstrahlen nicht von einer Fläche, sondern womöglich von einem Punkte ausgehen zu lassen, was man dadurch erreichen kann, daß man der

Kathode die Form eines kleinen Hohlspiegels gibt und in dessen Brennpunkt jenes Platinblech, die sogenannte **Antikathode**, am besten unter einem Winkel von 45° gegen die Röhrenachse geneigt, anbringt.

Abb. 824 zeigt eine nach diesem Prinzip von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft hergestellte Röhre, an der die beiden seitlichen Elektroden hohlkugelförmig gekrümmt sind, um abwechselnd als Kathode dienen zu können, während die Mittelelektrode die Antikathode bildet, von welcher die X-Strahlen sich ausbreiten.

Eine andere, nicht unwesentliche Verbesserung der Vakuumröhren besteht darin, daß man den Druck in ihnen regulieren kann. Vakuumröhren werden nämlich häufig infolge der während des Gebrauchs in ihnen stattfindenden Druckänderungen allmählich unwirksam. Durch die Erwärmung der von den Kathodenstrahlen getroffenen Röhrenwandung wird die dem Glase anhaftende Luftschicht losgelöst, während durch Zerstäuben der Elektroden Luft gebunden wird. Dadurch steigt oder sinkt der Luftdruck in der Röhre, und bei allzu großen Druckänderungen hört die Wirksamkeit der Röhre auf.



823. Deprezscher Unterbrecher.

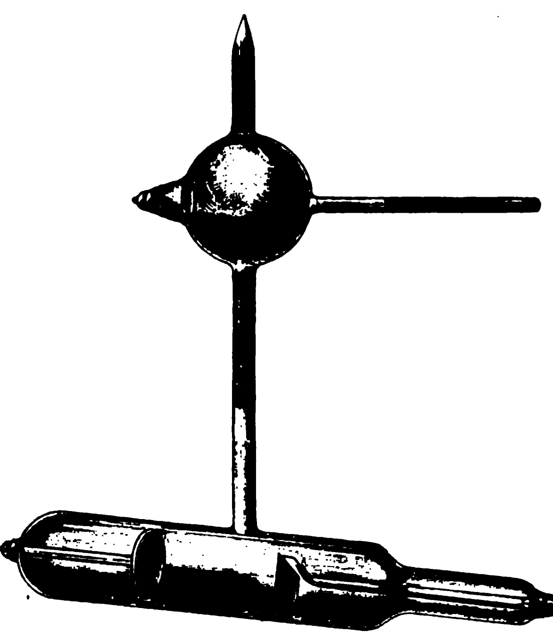
824. Röntgenröhre der Allgem. Elektrizitäts-Gesellschaft.

Eine Röhre mit regulierbarem Vakuum bietet daher den Vorteil, daß während des Gebrauchs der Druck in ihr stets auf die Höhe eingestellt werden kann, bei der sich die intensivste Bestrahlung und die schärfsten Bilder ergeben. Das Mittel zur Verminderung des Luftdrucks ergab sich aus der Beobachtung, daß die beim Stromdurchgange leuchtende Luft mit den Dämpfen des Phosphors, Jods und ähnlicher Stoffe feste Körper bildet, während eine Zunahme des Drucks durch Erwärmen der Rohrwandung und Vertreiben der an der Glasfläche verdichteten Luftschicht erreicht werden kann.

Abb. 825 stellt eine nach diesem Prinzip von der Firma Siemens und Halske konstruierte, neue Röntgenlampe dar. Das cylindrische Entladungsrohr enthält eine als Hohlspiegel geformte Kathode aus Aluminiumblech und eine ebene, schräg zur Röhrenachse gestellte Platin-Anode. Eine mit dem Entladungsrohr verbundene Kugel trägt eine Hilfsanode und dieser gegenüber ein Ansatzrohr, dessen Wandung mit dem zur Luftabsorption dienenden Phosphor bedeckt ist. Ist der Luftdruck im Rohr zu hoch, so legt man den positiven Pol des Induktoriums an die Hilfselektrode der Kugel und läßt den Entladungsstrom so lange auf die Luft und den Phosphordampf in der Kugel einwirken, bis die stärkste Intensität des Leuchtens erreicht ist. Ist der Druck dagegen zu gering,

so kann man ihn erhöhen, indem man die Kugel mit einer Flamme erwärmt und dadurch die am Glase haftende Luftschicht in das Vakuum hineintreibt.

Es empfiehlt sich, die Schaltungsweise stets so zu wählen, wie Abb. 826 zeigt, bei welcher mittels des verschiebbaren Drahtes D zur Regulierung des durch die Röhre gehenden Funkens eine passende Nebenschlußfunkenstrecke eingeschaltet ist.

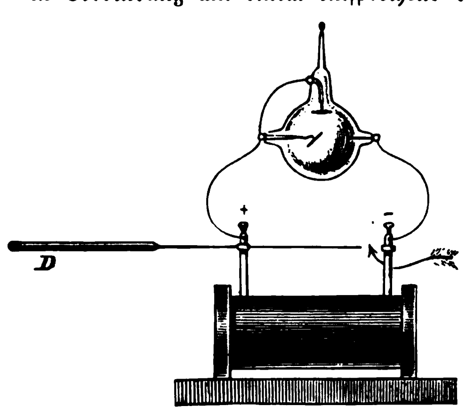


825. Röntgenlampe von Siemens und Halske.

Von den durch die Röntgenstrahlen zur Fluorescenz gebrachten Salzen, z. B. Kaliumplatincyanid, Calciumwolframat u. a. hat sich das Baryumplatincyanür am geeignetsten für die Herstellung von Fluorescenzschirmen erwiesen. Baryumplatincyanürschirme werden in großer Vollkommenheit von C. A. F. Kahlbaum in Berlin in allen Größen hergestellt. Für photographische Aufnahmen mittels Röntgenstrahlen sind die Schleußnerschen mit doppelter Emulsionsschicht versehenen Trockenplatten in erster Reihe zu empfehlen.

Die Expositionszeit für Röntgenaufnahmen, die früher ein bis zwei Stunden betrug, ist heute auf Bruchteile einer Sekunde reduziert und beträgt bei Aufnahmen des menschlichen Körpers nur wenige Minuten.

In Abb. 827 ist eine Zusammenstellung von Apparaten gegeben, wie sie für Durchleuchtungszwecke gebraucht wird. Der Induktor wird entweder mit geringerer Spannung durch eine Akkumulatorenbatterie oder in Verbindung mit einem entsprechend bemessenen Regulierwiderstand auch mit höherer Spannung, z. B. der Netzspannung eines Elektrizitätswerks, betrieben. Die Vakuumröhre ist verstellbar an einem Stative angebracht; zwischen ihr und dem Schirm befindet sich der zu beleuchtende Körper. Für photographische Aufnahmen wäre die Vakuumröhre mit ihrer wirkenden Fläche horizontal zu stellen.



826. Schaltung einer Röntgenröhre.

Um auch in einem nicht verdunkelten Zimmer mit dem Fluorescenzschirm arbeiten zu können, stellt Salvioni denselben vollständig in schwarze Umhüllung eingeschlagen in Form eines Guckkastens dar und gibt dann dem Apparat, der ja für gewisse Untersuchungen ganz bequem ist, den Namen Kryptoskop (Abb. 828).

Wir wollen nun einige interessante Aufnahmen bringen, welche in dem der Leitung des Prof. E. Grunmach unterstellten königlichen Institut für Röntgenuntersuchungen in Berlin aufgenommen worden sind.

Abb. 829 stellt den von hinten betrachteten Inhalt des Brustkastens eines Mannes dar, bei dem eine Kugel in dem hinteren Teile der sechsten Rippe sitzt. Man sieht daher das Herz mit seiner Spitze auf der rechten Seite des Bildes. Außerdem fallen in demselben die scharf ausgeprägten Rippen auf, zwischen denen die Lungen hell aufleuchten. Ließ man den Patienten während der Durchstrahlung des Brustkorbs starke Atem-

bewegungen machen, so konnte man die Kugel zugleich mit der sechsten Rippe sich mit bewegen sehen.

Abb. 830 zeigt die Verbreiterung der Hauptschlagader, die vom Herzen ausgeht (Anheurisma aortae). Dieses Blutgefäß erscheint in normalem Zustande halb so breit. Interessant war bei diesem Falle die Thatsache, daß die Verbreiterung dieses Hauptgefäßes mit unseren alten Untersuchungsmethoden sich nicht nachweisen ließ (Patient war deshalb früher als lungenkrank behandelt worden, während er herzkrank war), während



827. Induktor mit Apparaten zur Durchleuchtung.

das Leiden mit Hilfe der Röntgenstrahlen, abgesehen von dem verbreiterten Schattenbilde des Gefäßrohrs, schon aus den deutlich sichtbaren Pulsationen mit Sicherheit festgestellt werden konnte.

Abb. 831 stellt den Leib einer Patientin dar, mit einem Fremdkörper (verschlucktes Gebiß) im Darme, welcher links als ein leichter Schatten in dem weißen Teile zu erkennen ist. Man sieht den vom Operateur um den Leib gezogenen Drahtfaden, der dazu dient, vom Nabel aus die Entfernung abzumessen, in welcher der Einschnitt zu machen ist. Die Lage des Fremdkörpers war mittels der Röntgenstrahlen bis auf 1 mm genau erkannt worden.

Abb. 832 zeigt ein Ellenbogengelenk, an dem man genau den unteren Teil des oberen Armknochens in Verbindung mit dem Unterarmknochen, und zwar den oberen Teil der Speiche und des Ellenbogenbeins übersehen kann.

Abb. 833 endlich zeigt ein Kniegelenk, das in scharfen Konturen den unteren Teil des Oberschenkels, sowie die obere Partie des Schien- und Wadenbeins, außerdem auch die Kniescheibe bei rechtwinkelig gebogener Stellung des Ober- und Unterschenkels erkennen läßt.



828. Kryptoskop.

Diese Beispiele dürften genügen, um zu zeigen, daß die Röntgenstrahlen nicht nur ein wertvolles diagnostisches Hilfsmittel in der Chirurgie, sondern auch in der inneren Medizin darbieten. Nach der Meinung vieler Mediziner dürfte die Röntgensche Entdeckung dermaleinst für die Medizin eine Bedeutung gewinnen, wie etwa die Entdeckung der Antisepsis.

Die Verwendung des Röntgenschen Verfahrens ist aber nicht auf die medizinische Wissenschaft allein beschränkt, sie erweist sich von großem Nutzen auch für andere Wissenszweige, zum Studium der inneren Struktur organischer Gebilde, z. B. für die Botanik und Zoologie, und bietet hier gewisse Vorzüge gegenüber der Beobachtung mittels des Mikroskops, insofern die von letzterem auf der Retina entworfenen Schattenbilder der Objekte sich nur auf Schnitte minimaler Dicke beschränken, während das Röntgensche Verfahren den Inhalt einer großen Zahl von Schichten von zusammen erheblicher Dicke in einem einzigen Schattenbilde scharf darzustellen ermöglicht. So haben H. Hinterberger und A. Zahlbruckner in Wien und Goldstein in Berlin Röntgenbilder des Kalkschwamms der Koralle, des Seeigels aufgenommen, welche neben der Darstellung des Inneren auch die mit Dicke- und Dichtedifferenzen verknüpften Details der Oberfläche aufweisen und zeigen, daß bei den Röntgenaufnahmen eine Feinheit der Detailzeichnung erreicht werden kann, die über die Sehschärfe des normalen Auges vielleicht schon hinausgeht. Andere Bilder zeigten, daß auch schwach absorbierende Objekte, z. B. dünne Schichten organischer Gewebe, die zartesten Blüten und Laubblätter, deutlich zur Darstellung gebracht werden können. Die Röntgenbilder der Apfelblüte, der Rose, des Maiglöckchens u. s. w. zeigen nicht nur in scharfen Umrissen die Formen der Blüten, sondern lassen auch durch die Blumen- und Kelchblätter hindurch die Staubgefäße, Stempel und Fruchtknoten erkennen.



829. Röntgenphotographie des Brustkastens eines Mannes mit darin sitzender Kugel.

Auch hiermit ist die praktische Verwendbarkeit der neuen, geheimnisvollen Strahlen noch lange nicht erschöpft. Sie gewähren uns vortreffliche Dienste auch in anderen Zweigen der Naturforschung, der Technik und der Industrie; sie bieten uns wichtige Hilfsmittel für mineralogische Zwecke, für anatomische, biologische und bakteriologische Studien, sie werden benutzt zur Wiedergabe von Reliefs durch photographische und heliographische Abbildungen, für die Untersuchung von Nahrungsmitteln und vieler technischer Produkte. Um in dieser Hinsicht nur ein interessantes Beispiel von vielen anzuführen, so läßt sich durch Röntgenstrahlen nicht nur die Beschwerung der Seide durch Metallsalze leicht nachweisen, sondern es lassen sich, wie aus einem in jüngster Zeit von J. Testenoir und D. Levrat der Handelskammer zu Lyon eingereichten Berichte über Versuche im dortigen Seidenlaboratorium hervorgeht, durch Röntgenstrahlen die männlichen Seidenkokons von den weiblichen sondern. Diese Unterscheidung ist von Wichtigkeit sowohl für die Abwickelung des Fadens, als auch besonders für Nachzucht- und Kreuzungsversuche, da der männliche Kokon mehr Seide liefert und deshalb Abarten, die mehr männliche Eier ergeben, wertvoller sind. Bisher hatte man nur das empirische Kennzeichen, daß die weiblichen Kokons im allgemeinen schwerer zu sein pflegen als die männlichen. Die Durchstrahlung ergab, daß der Hinterleib der weiblichen Puppen, weil er die unreifen, an Mineralsalzen reichen Eier enthält, weniger durchsichtig ist, als derjenige der männlichen.



880. Röntgenphotographie: Verbreiterung der Aorta.



881. Röntgenphotographie: Fremdkörper im Darm.

Wir können uns eines gewissen unheimlichen Gefühls über die Vielseitigkeit der Verwendung der neuen Strahlen kaum erwehren, wenn wir bedenken, daß das, was wir auf Reisen in Taschen und Körben mit uns tragen, und die Geheimnisse, die wir Briefen anvertrauen, ihrem durchdringenden Blicke nicht entgehen, denn es

ist gelungen, Briefe im verschlossenen Couvert zu photographieren, wenn die benutzte Tinte Metallsalze oder andere undurchlässige Stoffe enthält; Anilintinten geben glücklicherweise keine Schattenbilder.

Die Entdeckung der Röntgenstrahlen liefert uns einen Beweis dafür, wie ungerechtfertigt und falsch der Vorwurf ist, der bisweilen von Männern der „Praxis“ der wissenschaftlichen Forschung gemacht wird, daß sie sich mit Problemen beschäftige, die keinen direkten, greifbaren „praktischen“ Nutzen hätten. Jede naturwissenschaftliche Erkenntnis erweitert nicht nur den Schatz unseres Wissens, sondern bereichert bald durch einen glücklichen Zufall, bald durch die scharfsinnige Kombination eines genialen Forschers auch unser Vermögen, indem sie uns einen Einblick in das Walten und Weben der Natur gewährt, ihre Kräfte kennen, beherrschen und sie für unsere Lebenszwecke zu verwerten und dienstbar zu machen lehrt. Daß ernste Männer Tage und Wochen darauf verwenden können, das Farbenspiel einer Seifenblase zu studieren, würde gewiß Laien, deren Lebensbethätigung fern ab von solchen Dingen liegt, zu dem ungerechten Urteile verleiten, daß dies doch nur eine wissenschaftliche, wo nicht gar nutzlose Spielerei sei; und doch haben sich hiermit Forscher allerersten Ranges beschäftigt und auf ihren Versuchen eine Theorie begründet, deren praktische Erfolge bedeutende sind. Die nähere Erforschung der Eigentümlichkeiten der Kathodenstrahlen, die seit etwa vier Dezennien von den verschiedensten Forschern in Angriff genommen und geräuschlos und unbekümmert um unmittelbaren praktischen Gewinn in ihren Laboratorien gefördert worden ist, ist bis vor kurzem vom großen Publikum vielleicht nur als eine unpraktische wissenschaftliche Liebhaberei angesehen worden. Sie hat in ihrer ruhigen, allmählichen und stetigen Entwickelung zur epochemachenden Entdeckung der Röntgenstrahlen geführt, die in wissenschaftlicher, technischer und durch ihre befruchtende Rückwirkung auf viele Industriezweige auch in wirtschaftlicher Hinsicht von größter Bedeutung ist, und hat vielversprechende Aussichten auf die Erklärung gewisser Himmelserscheinungen und gewisser Beziehungen zwischen den Zuständen der Sonne und den elektrischen sowie den magnetischen Erscheinungen der Erde eröffnet. Die Untersuchungen von Heinrich Hertz verfolgten den Zweck, der Faraday-Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie zum Siege zu verhelfen und den inneren Zusammenhang und die Einheitlichkeit verschiedener Erscheinungsformen nachzuweisen. Die epochemachenden Entdeckungen, durch die er zunächst die Wissenschaft bereichert und der wissenschaftlichen Forschung neue Bahnen erschlossen hat, haben aber in überraschend schneller Weise, wie die Versuche von Tesla und von Marconi erwiesen, die höchste praktische Bedeutung gewonnen und der Technik Probleme gestellt, deren vollständige Lösung wohl erst dem neuen Jahrhundert vorbehalten bleiben wird. Der Gelehrte muß also in der Wahl seiner Untersuchungen, unbekümmert um den unmittelbaren, äußeren Erfolg und Gewinn, frei sein, und die Wissenschaft um ihrer selbst willen gepflegt werden; ihre Errungenschaften kommen doch früher oder später dem allgemeinen Wohl der Menschheit zu gute.



882. Röntgenphotographie des Ellenbogengelenks.



883. Röntgenphotographie des Kniegelenks.

III.

Die Kraftmaschinen

von

Ingenieur E. Rosenboom

Die Kraftmaschinen.

Einleitung.

Begriff und Haupteinteilung der Kraftmaschinen. Die beseelten Motoren. Der Mensch als Kraftmaschine. Göpel.

Das Bedürfnis der Menschen nach größeren Kräften für die Verrichtung von Arbeiten, als der Mensch selbst mit seiner Muskelkraft direkt oder an den im ersten Abschnitt dieses Bandes besprochenen einfachen Maschinen und deren Kombinationen leisten konnte, ist zweifellos schon sehr alt, so alt wie die Anfänge der Kultur.

Die früher beschriebene Sâkije, das uralte ägyptische von einem Büffel betriebene Schöpfrad stellt bereits eine Vorrichtung dar, um statt der Kräfte des eigenen Körpers andere zur Erzeugung nutzbarer Arbeit zu verwenden; auch Wasserräder waren bei den Ägyptern schon in Anwendung. Aber sehr lange Zeit, viele Jahrhunderte sind bei den Kraftmaschinen fast keine Fortschritte zu verzeichnen; die eigentliche Entwickelung derselben gehört fast ausschließlich der neueren Zeit und zwar zum weitaus größten Teile den letzten hundert Jahren an.

Es ist schon früher eingehend dargelegt worden, daß die im gewöhnlichen Leben allgemein gebräuchliche Bezeichnung Krafterzeugung streng genommen unzulässig ist, daß nie auf irgend welche Weise Kraft erzeugt werden, sondern daß nur vorhandene Kraft oder Energie umgewandelt und nutzbar gemacht werden kann. Wir haben ebenso schon früher bei der Besprechung des Grundgesetzes der Mechanik von der Erhaltung der Energie, sowie der Einheit der Kraft gesehen, daß alle in der Natur, wenigstens in unserem Sonnensystem, auf unserer Erde vorhandene Energie in letzter Linie von der Sonnenwärme herrührt. Wir sehen in der Ebene, wie der Wind zahlreiche Windmühlen zum Mahlen des Getreides treibt; im Gebirge finden wir große Wasserräder, welche die Kraft des rauschend herniederströmenden Gebirgswassers auffangen und an Sägewerke übertragen. In den Städten und Industriegegenden ragen zahlreiche hohe Schornsteine in die Luft, aus denen dunkle Rauchwolken emporsteigen; regelmäßig zischen und pusten aus anderen Röhren weiße Dampfwolken hervor; es sind die Zeugen der Dampfmaschinen, welche in den Bergwerken die Fördermaschinen betreiben, um aus der Tiefe der Erde die Kohlen und Erze an die Oberfläche zu schaffen, in den Wasserwerken die Pumpen in Gang setzen, in den Spinnereien Hunderte von Spindeln drehen, in den großartigen Eisenwerken riesige Hämmer betreiben, die große, viele Zentner schwere glühende Eisenmassen in die gewünschte Form schmieden, oder mächtige Walzen, die in wenigen Minuten durch ihre Drehung Eisenbahnschienen und Träger aus ihnen pressen oder sie zu den feinsten Blechen auswalzen oder zu Drähten ausziehen. Durch die Ebene braust der Eilzug, der Menschen und Güter in ebensoviel Stunden in ferne Städte und Länder trägt, als früher Tagereisen erforderlich waren. Wie verschieden alle diese Kraftäußerungen sich darstellen, sie sind doch nur Ausflüsse einer und derselben Naturkraft,

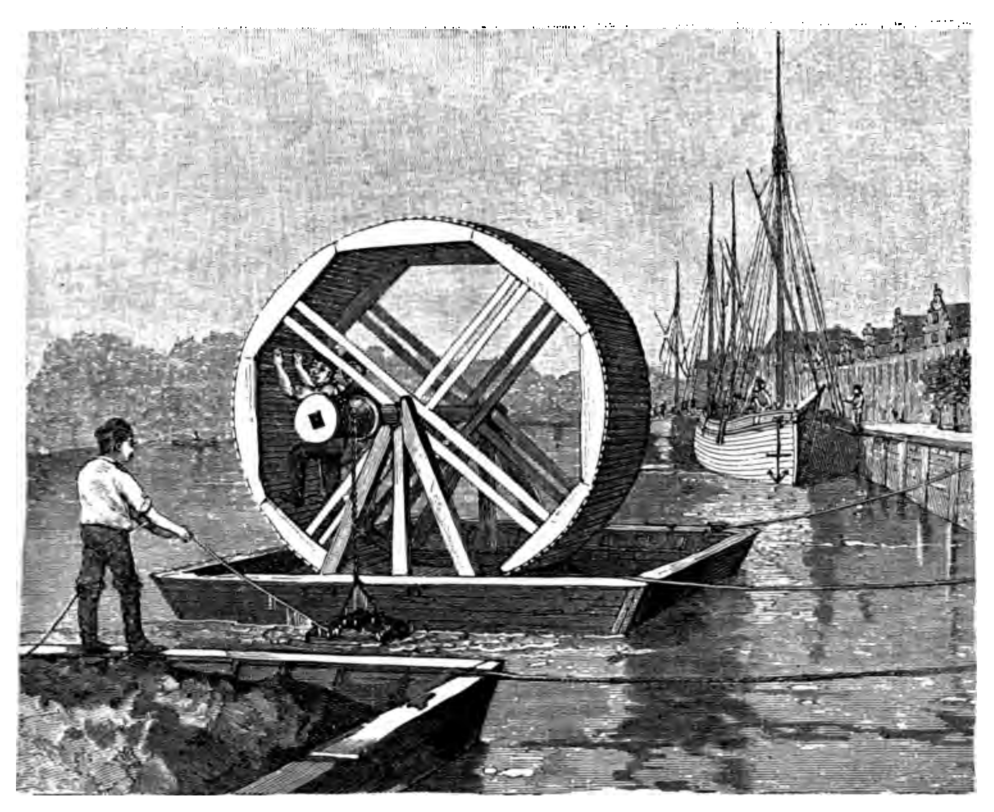
der Sonnenwärme. Im Brausen des Windes und im Rauschen des Wasserfalles, wie in den Kraftwirkungen des gespannten Wasserdampfes zeigt sich dieselbe, nur in verschiedener Form; Luft und Wasser und Dampf besitzen keine besondere, ihnen eigentümliche Kraft, sie übertragen alle nur, doch auf verschiedene Weise, die Kraftwirkung der Wärme und zwar der Sonnenwärme, da wir in unserer Natur nur eine ursprüngliche, selbständige Wärmequelle haben, nämlich die Sonne. Kraftmaschinen sind also nicht zu erklären als Maschinen zur Erzeugung von Kraft, sondern zur Beschaffung nutzbarer mechanischer Arbeit.

Vom praktischen Standpunkt aus aber unterscheiden wir nach den verschiedenen Naturkräften, die sich ja in sehr verschiedener Weise äußern, verschiedene Klassen von Kraftmaschinen. Eine prinzipielle Unterscheidung können wir zunächst machen zwischen der Ausnutzung von Naturkräften, die als lebendige Kraft auftreten, also an bewegte Massen gebunden sind, und der Umwandlung von latenter oder potentieller Energie. Erstere werden kurzweg als Naturkräfte (im engeren Sinne) bezeichnet, und es kommt praktisch in Betracht die Wasserkraft und die Windkraft, während alle Kraftmaschinen, die durch künstliche Verbrennung erzeugte Wärme benützen, die Wärmemotoren oder kalorischen Maschinen zu der zweiten Klasse gehören. Nach dieser Einteilung werden in den folgenden Kapiteln behandelt die Windräder, die Wasserräder, Turbinen und Wassersäulenmaschinen, schließlich die drei Gattungen der kalorischen Maschinen, nämlich Dampfmaschinen, Gas- (sowie Petroleum- und Benzin-) motoren und Heißluftmaschinen.

Eine besondere Stellung nehmen die belebten Motoren ein. Die Menschen und Tiere sind vom mechanischen Standpunkte aus betrachtet außerordentlich komplizierte Motoren. Man hört häufig den Vergleich, der menschliche Körper und die Tiere seien Dampfmaschinen; die Speisen stellen die Kohlen vor, durch deren langsame Verbrennung (Oxydation) mittels des eingeatmeten Sauerstoffes Kraft erzeugt werde. Dieser Vergleich hinkt aber sehr; welches Organ soll denn dem Hauptteile der Dampfmaschine, dem Cylinder nebst Kolben, entsprechen, und was vertritt den Kraftträger Wasserdampf? Bis vor kurzer Zeit wurde aber doch ziemlich allgemein angenommen, daß die lebendige Maschine eine thermodynamische oder Wärmekraftmaschine sei, da ihr Arbeitsvermögen von der Aufnahme verbrennbarer Speisen sowie dem Einatmen von Sauerstoff abhängt und da auch im lebenden tierischen Körper Wärme erzeugt wird. Dieser Schluß ist aber in letzter Zeit als unrichtig nachgewiesen worden; bei jeder thermodynamischen Maschine hängt die Leistung von einem Temperaturgefälle ab, wie weiterhin bei den kalorischen Maschinen näher dargelegt wird; beim menschlichen oder tierischen Körper finden aber keine merklichen Temperaturveränderungen statt; die Bluttemperatur ist bekanntlich im gesunden Körper sehr konstant. Auch die frühere Ansicht verschiedener Naturforscher, daß die lebendige Maschine eine elektrodynamische Kraftmaschine sei, ist nicht haltbar, denn in den Muskeln, in denen ja die mechanische Arbeit erzeugt, oder aus anderer Energie umgewandelt, also frei wird, finden sich keine Organe, welche die charakteristischen Hauptteile der elektrodynamischen Motoren vertreten könnten. Durch sehr zahlreiche und sorgfältige Versuche und Forschungen ist allerdings festgestellt, daß den tierischen Körper elektrische Ströme durchziehen und daß die Nerven die Leiter derselben sind; aber zur Verrichtung mechanischer Arbeit sind dieselben viel zu schwach. Nur einige wenige Tiere, wie der Zitterrochen, vermögen kräftige elektrische Schläge zu erzeugen; dieselben besitzen aber zu diesem Zweck besondere große Organe, welche elektrische Batterien darstellen. Bei den meisten Tieren dienen dagegen die vom Zentrum, dem Gehirn, ausgehenden Nerven nur dazu, eine Bewegung oder Arbeit einzuleiten; sie übermitteln gleichsam vom Denkorgane den Befehl an die Arbeitsorgane, die Muskeln.

Wahrscheinlich stellen die lebendigen Motoren chemische Dynamomaschinen dar; erklärt ist die Wirkungsweise derselben bisher noch keineswegs, aber diese Möglichkeit ist die letzte der überhaupt bekannten Formen, durch welche potentielle in kinetische Energie oder mechanische Arbeit übergeführt werden kann, und wir müssen sie, da die anderen beiden auszuschließen sind, vorläufig als die zutreffende annehmen. Ob nicht noch einmal eine andere Möglichkeit gefunden werden wird, vielleicht eine bisher noch gar nicht bekannte

Energieform, kann indessen nicht gesagt werden. Man nimmt jetzt an, daß die Arbeitskraft in den Muskeln durch sehr schnelle, sogenannte explosive chemische Wirkungen, nämlich die Umgestaltung von Fett und ähnlichen angehäuften organischen Stoffen zu Glykoseverbindungen und deren Oxydation zu Kohlensäure und Wasser, welche ausgeatmet und ausgeschwitzt werden, bewirkt wird, wodurch die in dem Fett u. s. w. enthaltene potentielle Energie in Arbeit umgesetzt wird. Den Anstoß zu solchen chemischen Wirkungen geben die Nerven, und zwar entspricht die Nerventhätigkeit ganz einem elektrischen Strome; durch diesen Nervenanstoß wird zugleich die Größe und Richtung der zu leistenden Arbeit in gewollter Weise geregelt. Das im Rückenmark und Gehirn zusammenlaufende Nervengewebe überträgt also nicht Energie, sondern es löst dieselbe nur aus, wie der elektrische Funke die Zündung einer Sprengmine bewirkt.

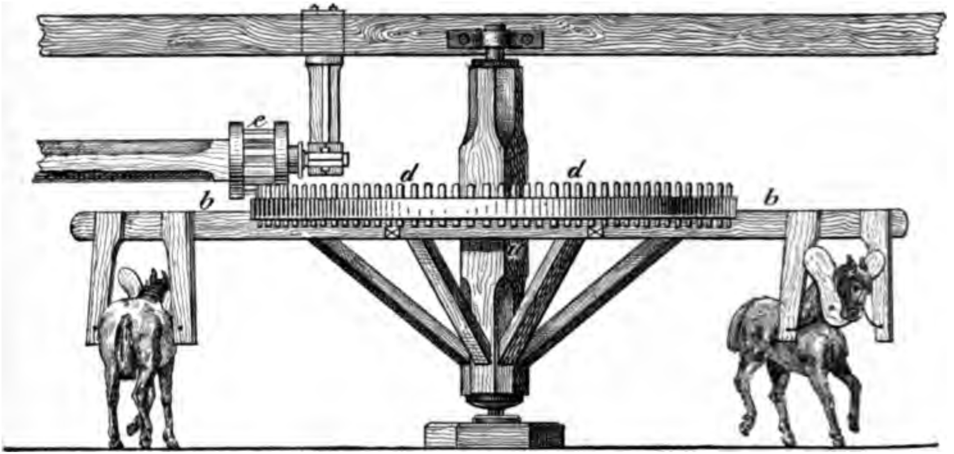


834. Norwegisches Tretrad. („Scientific American".)

Diese „Erklärungen" sind allerdings noch keineswegs klar oder bewiesen, aber sie geben wenigstens eine Idee, wie die Vorgänge sich möglicherweise abspielen können oder wahrscheinlich stattfinden.

Wie bei allen Arbeitsmaschinen können wir auch bei den lebendigen Maschinen von einem Wirkungsgrad oder Nutzeffekt sprechen. Allgemein bedeutet dieser Begriff das Verhältnis zwischen der einer Maschine in irgend einer Form zugeführten Energiemenge und der nutzbar geleisteten Arbeit. Um das einfachste Beispiel anzuführen, ist also der Wirkungsgrad eines Wasserrades, welches pro Sekunde 1 cbm Wasser mit 5 m Gefälle zugeführt erhält und 4000 smkg Arbeit an die Welle abgibt, $\frac{1 \cdot 1000 \cdot 5}{4000} = 0{,}8$ oder 80 %. Bei den Wärmemaschinen steckt die zugeführte Energie in dem mechanischen Äquivalent der Verbrennungswärme des Heizmateriales; es wird also einer Dampfmaschinenanlage, im ganzen einschließlich des Dampfkessels betrachtet, mit jedem Kilo-

gramm verbrannter Kohle von 8000 Kalorien Heizwert (da 425 nach früherem das mechanische Wärmeäquivalent einer Kalorie ist) eine Energie von 8000 × 425 smkg zugeführt. Die Nahrungsmenge, welche ein mittelstarker Arbeiter bei vollem Tagewerk seinem Körper zuführen muß, entspricht etwa 3000—4000 Kalorien Verbrennungswärme, also einem mechanischen Äquivalent von etwa 150000 kgm. Die mechanische Arbeitsleistung eines Menschen ist sehr verschieden, je nach der Art, wie er seine Kraft anwendet; am vorteilhaftesten ist es, wenn der Arbeiter zum Teil unter Anstrengung der Beinmuskeln oder ganz sein Körpergewicht mit verwendet, z. B. bei Treträdern oder Kurbeln; bei angestrengter Thätigkeit kann ein an solche Arbeit gewöhnter Mann auf diese Weise in zehnstündigem Tagewerk etwa 290000 kgm leisten; der Wirkungsgrad wäre hierbei $\frac{290000}{1500000} = 0{,}19$ oder 19 %; in Teilen einer Maschinenpferdestärke ausgedrückt, beträgt die Arbeitsleistung etwa $^1/_7$ Pferdestärke. 0,19 ist ein außerordentlich hoher Wirkungsgrad, welcher, wie wir später sehen werden, von den besten modernen Dampfmaschinen bei weitem nicht erreicht wird; der Mensch als Kraftmaschine nutzt die mit der Nahrung zugeführte Energie etwa doppelt so gut aus, wie größere gute Dampfmaschinenanlagen



835. Feststehender Göpel.

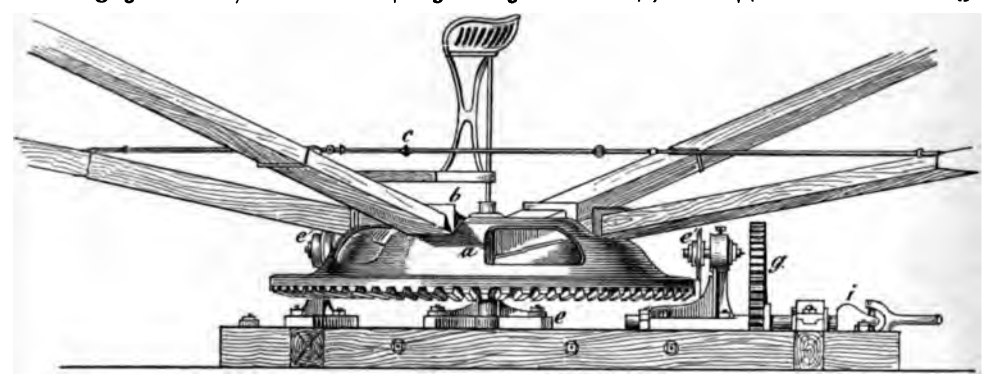
die Verbrennungswärme der Kohle, oder viermal so gut, wie mittlere, keineswegs schlechte Maschinen. Vom wirtschaftlichen Standpunkte aus, der für die Praxis allein maßgebend ist, stellt sich allerdings das Rechenexempel wesentlich anders, denn das Brennmaterial der menschlichen Kraftmaschine, die Nahrung, ist etwa dreißigmal teurer als die Steinkohle, welche unter den Dampfkesseln verbrannt wird.

Die Maschinen zur Aufnahme der Menschenkräfte sind schon im ersten Abschnitt besprochen; es sind hauptsächlich der Hebel (Druckbaum, Balancier), die Rolle und der Flaschenzug, das Wellrad (Kurbel, Winde, Sprossenrad). Es sei hier noch ein Tretrad erwähnt, welches in Norwegen zum Baggern benutzt wird (s. Abb. 834); dort sind die Arbeitsmethoden und technischen Hilfsmittel in vielen Teilen noch so primitiv, wie vor fünfzig oder hundert Jahren; die Menschenarbeit ist sehr billig und wird noch vielfach anstatt Dampfkraft angewendet, wo nach unseren Begriffen unbedingt letztere am Platze wäre. Wie die Abbildung zeigt, ist auf einem breiten, flachgehenden Fahrzeuge ein großes hölzernes Rad aufgestellt, dessen Welle eine Kettentrommel trägt. Zwei Arbeiter setzen das Rad durch Voranschreiten, bezw. Aufwärtsklettern in Bewegung (wie bei dem früher beschriebenen Sprossenrad) und ziehen so den Bagger an der Kette in die Höhe.

Die mechanische Arbeitskraft des Menschen wird im allgemeinen heute nur noch in solchen Fällen ausgenutzt, wo die erforderliche Arbeitsleistung klein ist, oder nur für kurze Zeit verlangt wird, so daß sich die Aufstellung einer Kraftmaschine nicht lohnt, sowie besonders für solche Arbeiten, die von Maschinen nicht bewirkt werden können. In neuerer

Zeit wird die Menschenarbeit immer mehr von der Maschinenarbeit verdrängt, auch für Zwecke, bei denen dies früher nicht für möglich gehalten wurde, wie in der Weberei und Spinnerei; bei den landwirtschaftlichen Arbeiten (Säen, Mähen, Dreschen), bei der Herstellung von Kanälen (Baggermaschinen) und besonders in der Eisenindustrie (Massenfabrikation von Kleineisenzeug, gewalzten und geknoteten Gliederketten, Schlüsseln, hydraulisches Nieten u. s. w.), sowie überhaupt in den meisten Gewerben. Immer bleiben aber doch manche Arbeiten, die jetzt und auch wohl später nur von Menschenhand ausgeführt werden können. Hauptsächlich sind das solche, die in jedem einzelnen Falle andere Bedingungen bieten, die mehr oder weniger Intelligenz des Arbeiters oder des eine Anzahl Arbeiter leitenden Aufsehers verlangen, um in jedem Falle die zweckmäßigsten Mittel und Wege zu benutzen.

Durch die Erfindung der Dampfmaschinen, oder richtiger die Konstruktion solcher in praktisch brauchbarer Form und die allgemeine Einführung derselben, also seit Anfang dieses Jahrhunderts, ist auch die Benutzung von Tieren als Kraftmaschinen sehr in den Hintergrund getreten; immerhin ist dieselbe aber noch sehr wichtig und wird es auch noch lange bleiben. Für die Beförderung von Lasten auf nicht zu große Strecken, und besonders in der Landwirtschaft werden noch immer hauptsächlich Pferde als Motoren benutzt. Am vorteilhaftesten arbeiten Pferde, wenn sie in gerader Richtung fortschreitend einen Zug ausüben; die Arbeitsleistung beträgt dann bei schweren Pferden 70—80 smkg

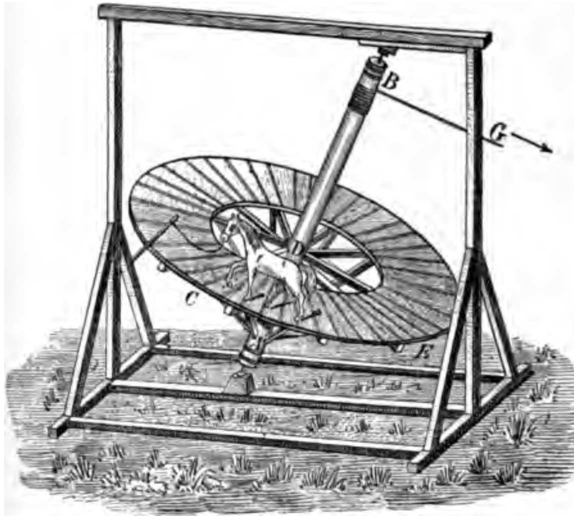


886. Transportabler Göpel.

also etwa so viel, wie eine Maschinenpferdekraft, bei leichteren Pferden etwa 60 smkg bei neunstündiger Arbeitszeit; wenn die Arbeit durch häufige längere Pausen unterbrochen wird, kann die Leistung bis zu 100 smkg steigen. Entschieden ungünstiger ist die Leistung in Göpeln wegen der fortwährenden Körperwendung; sie beträgt hierbei bis 65 smkg. Die Göpel werden in der Landwirtschaft sowie in Ziegeleien, Thonmühlen u. s. w. noch vielfach für kleinere Arbeitsleistungen verwendet, wenn auch die Dampfmaschinen, besonders die bequemen, leicht aufzustellenden und zu bedienenden Lokomobilen auch für solche Betriebe in neuerer Zeit immer mehr Eingang finden. Zum Betriebe von Göpeln dienen meist Pferde, seltener Ochsen oder Esel; dieselben ziehen, indem sie in einem Kreise gehen, an einem Hebel, dem Göpelarm oder Schwengel. Abb. 835 stellt einen feststehenden Göpel gewöhnlicher Art dar; die vertikale Hauptwelle a ruht unten in einem Spurlager und wird oben durch einen Zapfen in einem Balken geführt. Auf der Welle sitzt unten das große horizontale Kammrad d, an den beiden Gabeln c c der Zugbäume b b werden die Zugtiere angespannt. Die zu geringe Umdrehungsgeschwindigkeit, welche von dem langsamen Gange der Tiere herrührt, wird dadurch vergrößert, daß das Zahnrad e, in welches das Kammrad d eingreift, viel kleiner ist, als letzteres; e sitzt auf einer horizontalen Welle, welche die Kraft auf die Arbeitsmaschinen (Dreschmaschine, Häckselschneidemaschine, Thonmühle u. s. w.) überträgt.

Wenn man örtlich weniger gebunden sein, also Arbeitsmaschinen an verschiedenen Stellen betreiben will, wendet man transportable Göpel an, welche leicht fortgeschafft

und überall aufgestellt werden können; einen solchen zeigt Abb. 836 und zwar einen deutschen Göpel mit Glockenrad. a ist das unten mit Verzahnung versehene Glockenrad, welches vier Schuhe zum Einstecken der Göpelarme hat; letztere sind durch Spannstangen c untereinander verstrebt. Das Rand dreht sich um einen festen Zapfen, der mittels der Fußplatte e auf einem Balken befestigt wird; der äußere Rand der Glocke läuft unter drei auf niedrigen Böcken angebrachten Leitrollen e', wodurch das Rad in horizontaler Lage im Gleichgewicht gehalten wird. Die Zähne des großen Rades greifen in ein Rädergetriebe ein, durch welches mittels der Gelenkkuppelung i die horizontale Arbeitswelle in Drehung versetzt wird.



837. Tretrad für Pferde.

Hier und da findet man in der Landwirtschaft auch noch die in Abb. 837 abgebildete Tretscheibe angewendet, auf welcher Pferde oder Ochsen arbeiten können. Die Wirksamkeit ist aus der Abbildung leicht zu erkennen; auf der unter 20 bis 25° geneigt stehenden Welle AB, die unten und oben in einem Rahmen gelagert ist, sitzt die mit radial laufenden Latten beschlagene starke hölzerne Scheibe CDE von 12 bis 15 m im Durchmesser; dieselbe ist entsprechend der Welle gegen die Horizontale geneigt, und das auf ihr fortschreitende Arbeitstier bringt durch sein Gewicht die Scheibe und Welle zur Umdrehung. Von letzterer aus wird in irgend welcher Weise die Kraft übertragen; in der Abbildung stellt G den in der Richtung des Pfeiles wirkenden, zu überwindenden Widerstand dar.

Die Windräder.

Ursprung der Windmühlen. Bockwindmühle und holländische Windmühle. Leistung und Anwendbarkeit der Windmühlen. Neuere sogenannte amerikanische Windräder. Großes amerikanisches Windrad für eine elektrische Beleuchtungsanlage. Horizontale Windräder.

Über die Erfindung und erste Anwendung von Windrädern ist nichts Bestimmtes nachgewiesen; bei den alten asiatischen Kulturvölkern, sowie auch bei den Griechen und Römern waren sie nicht bekannt; die frühere Annahme, daß die Windmühlen aus dem Orient stammen und während der Kreuzzüge nach Europa gebracht worden seien, ist sehr unwahrscheinlich, denn im ganzen Osten sind keine älteren Windmühlen vorgefunden worden; sie sind dort noch heute fast unbekannt. Wahrscheinlich sind die Windräder deutschen Ursprungs und in der zweiten Hälfte des 11. Jahrhunderts erfunden worden; die Windmühlen ältester Bauart hießen von jeher deutsche Windmühlen. Den ältesten bekannten genauen Nachweis über Windmühlen enthält ein Aktenstück aus dem Jahre 1105, in welchem einem Kloster in Frankreich die Erlaubnis zur Anlage von solchen erteilt wird. Im 12. Jahrhundert fanden die Windmühlen bereits ausgedehnte Anwendung in verschiedenen europäischen Ländern.

Über die Wirkungsweise der Windräder ist bereits früher (I. Abschnitt dieses Bandes) gesagt worden, daß die Kraft des auf die schräggestellten Flügel wirkenden Windes in zwei Komponenten zerlegt wird; der Wind übt infolgedessen einen seitlichen Druck auf die Flügel aus, welcher letztere in Drehung versetzt. Die Leistung eines Windrades hängt hiernach, abgesehen von der mehr oder weniger vorteilhaften Konstruktion, von der Größe

der Flügelfläche und dem Druck des Windes ab, und letzterer wieder wird bestimmt durch die Windgeschwindigkeit.

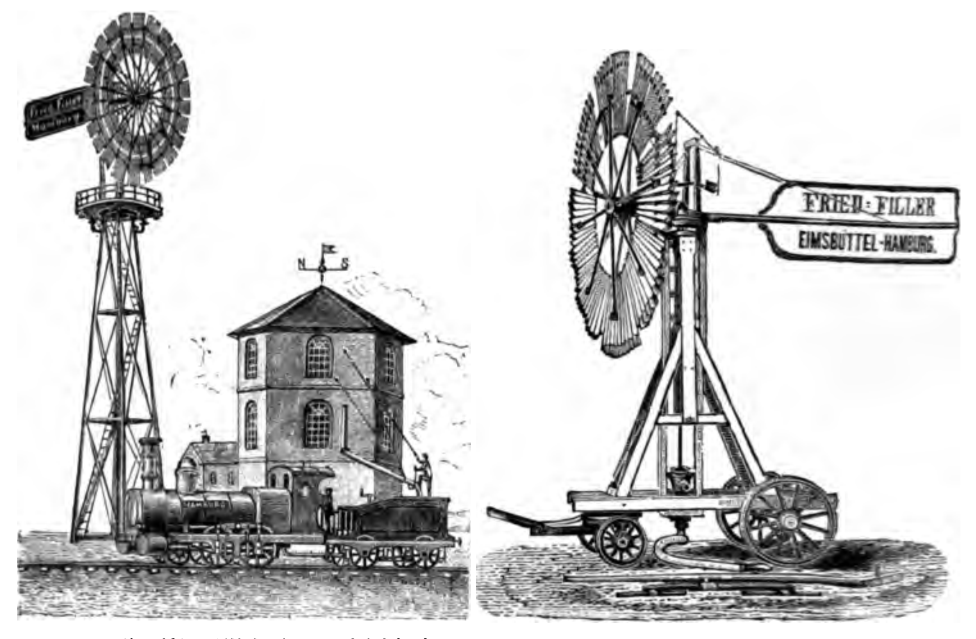
Bei den alten deutschen Bockwindmühlen war das Windrad mit dem Gebäude fest verbunden; das Ganze ist drehbar um einen festen vertikalen Pfosten; mittels eines langen Hebels wird die ganze Mühle um den Pfosten nach der Windrichtung gedreht. Viel später als die Bockwindmühlen kamen die holländischen Windmühlen in Benutzung; dieselben haben ein festes turmartiges Gebäude mit drehbarem Dache; in letzterem ist die Welle des Flügelrades gelagert. Bei beiden Arten dieser älteren Windmühlen wird von der schrägen Radwelle mittels konischer Zahnräder eine senkrechte Achse gedreht, die den Mühlstein in Bewegung setzt. Die Flügel bestehen aus hölzernen Rahmen mit Rippen, die zur Aufnahme des Windes mit Segeltuch bespannt oder mit dünnen Blechscheiben belegt sind. Bei den älteren deutschen Windmühlen bilden die Flügel ebene Flächen, die schräg gegen die Windrichtung gestellt sind; bei den holländischen Windmühlen dagegen ist die Fläche des Flügels eine gekrümmte, wodurch die Wirkung erheblich vorteilhafter wird. Je nach der Stärke des Windes wird bei den älteren Windmühlen die Fläche der Flügel ganz oder nur teilweise mit Segelleinen oder Blechplatten belegt, die Druckfläche für den Wind also größer oder kleiner gemacht.

In der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts wurden zuerst Windmühlen konstruiert, bei denen durch ein besonderes kleineres Steuerrad oder einen breiten Steuerflügel an der den Hauptflügeln entgegengesetzten Seite des Daches letzteres selbstthätig nach der Windrichtung eingestellt wurde. Auch bemühte man sich damals schon, das lästige und umständliche Bespannen der Flügel mit Segeltuch oder das Bedecken mit mehr oder weniger Blechscheiben durch Einrichtungen zu ersetzen, die selbstthätig von der Windkraft reguliert werden. Bei einer Konstruktion des Schotten Meikle ist die ganze Fläche der Flügel mit jalousieartigen Klappen versehen, die um Zapfen drehbar sind; je nach ihrer Stellung bedecken sie die Flügel als eine geschlossene Fläche und bieten so dem Winde die größte Druckfläche, oder sie stehen parallel mit ihren dünnen Kanten gegen den Wind gerichtet, so daß derselbe zwischen ihnen durchpassieren kann. Die einzelnen Klappen werden durch Federn in der ersteren Lage gehalten, und je nach der Stärke des Windes werden sie entgegen diesem Federdruck mehr oder weniger aus ihrer geschlossenen Lage herausgedrückt, so daß starker Wind eine geringere Druckfläche hat, als schwacher; auf diese Weise wird der wirksame Winddruck und damit die Umdrehungsgeschwindigkeit einigermaßen reguliert.

Später ist man von dieser Art der automatischen Einstellung wieder abgegangen, und man hat Einrichtungen konstruiert, durch welche von unten mit der Hand die Druckflächen je nach der Windstärke eingestellt werden können. Man wendet zur Bedeckung der Flügel Jalousierahmen an, deren einzelne rechteckig längliche Klappen quer zur Breite des Flügels stehen und um Zapfen an ihren Schmalseiten drehbar sind. Alle Klappen jedes Flügels sind mit einer Zugstange verbunden, und letztere vereinigen sich in einem Winkelhebel in der Mitte des Rades; derselbe ist mittels einer durch die hohle Radwelle gehenden Schubstange beweglich, welche an der dem Rade entgegengesetzten Seite aus der Welle hervorsteht und eine Zahnstange trägt; in letztere greift ein Zahnsegment ein, welches von unten durch Zugseile nach der einen oder anderen Richtung gedreht werden kann, wodurch also die Jalousieklappen der Flügel geöffnet oder geschlossen werden. Man kann mit dieser Einrichtung auch eine automatische Einstellung bewirken oder verbinden, indem man an das Zugseil, welches die Schließung bewirkt, ein Gewicht anhängt, welches so bemessen ist, daß es bis zu einer bestimmten Windstärke die Klappen geschlossen hält; ein stärkerer Winddruck öffnet unter Überwindung dieses Gewichtes die Klappen und stellt sie schräg. Bei einer anderen Konstruktion bestehen die Flügel ans einem einzigen vollen Stück und sind um eine mittlere Längsachse drehbar. Der Winddruck sucht die Flügel so zu stellen, daß ihre Flächen parallel zur Windrichtung stehen, der Wind also nur die scharfen Kanten trifft, ohne Arbeit zu verrichten. Ein Gewicht wirkt aber auf die Flügel in entgegengesetztem Sinne; dasselbe zieht mittels Rolle und Seil an einer durch die hohle Radwelle geführten Stange, welche vorn an vier Winkelhebeln angreift, die so mit den

Flügeln verbunden sind, daß der Zug des Gewichtes die Flügel stellt. Je nach der Größe des Gewichtes und der Stärke des Windes stellen sich also die Flügel mehr oder weniger schräg zur Windrichtung, so daß der zur Wirkung kommende Winddruck und damit die Arbeitsleistung konstant bleibt.

Durch die Fortschritte im Bau einfacher und ökonomisch arbeitender Dampfmaschinen sind etwa seit der Mitte unseres Jahrhunderts die Windmühlen in den Hintergrund getreten und von der Technik vernachlässigt worden; in der allgemeinen Konstruktion wie besonders der Ausführung der einzelnen Teile waren lange keine erheblichen Fortschritte gemacht worden. Da bei der unvollkommenen Ausführung die alten Windmühlen sehr schwer gingen, so mußten dieselben während eines großen Teiles des Jahres stillstehen; die Mühlenbesitzer kamen dazu, als Reserve Dampfmaschinen zu beschaffen, und wegen der Vorzüge derselben, der leichten Bedienung und steten Betriebsbereitschaft wurden sie schließlich in vielen Fällen als Hauptbetriebskraft beibehalten, und die Windräder kamen



838. Amerikanisches Windrad zum Betrieb einer Pumpe für eine Eisenbahn-Wasserstation.

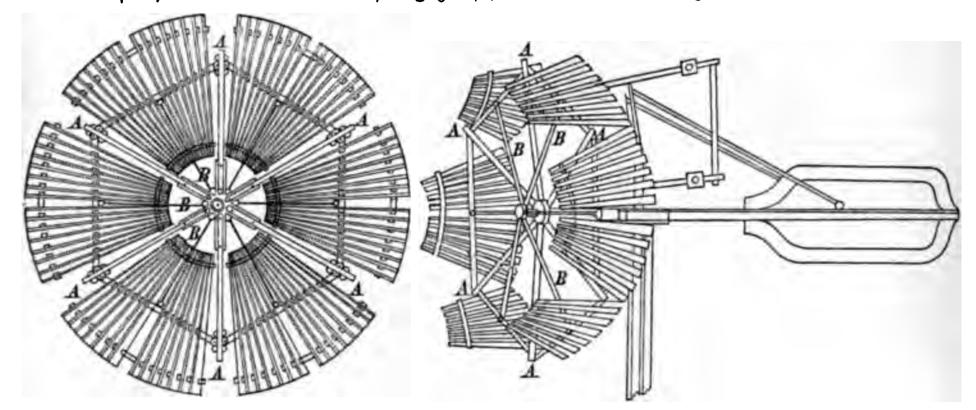
839. Transportables Windrad.

mehr und mehr außer Benutzung. Durch die Weltausstellung zu Philadelphia im Jahre 1876 wurden aber die großen Fortschritte bekannt, die in Nordamerika im Windmühlenbau gemacht waren, und alsbald wurden amerikanische Windräder, zunächst durch Vertreter amerikanischer Firmen, in Deutschland eingeführt; bald aber befaßte sich auch die deutsche Industrie selbst mit der Herstellung solcher verbesserten, sogenannten amerikanischen Windräder oder Windmotoren, und es dauerte nicht lange, bis die deutschen Fabrikate den amerikanischen vollkommen ebenbürtig und vielleicht an Solidität und sorgfältiger Ausführung überlegen waren. Hauptsächlich die Maschinenfabriken von Friedr. Filler in Hamburg-Eimsbüttel und Adolf Pieper in Mörs am Niederrhein waren es, die zuerst die amerikanischen Originale in Deutschland einführten und später selbst mit steigendem Erfolg die Ausführung derselben betrieben.

Die amerikanischen Windräder sind meist auf einem hohen hölzernen oder eisernen Gerüst montiert; das in Deutschland am meisten eingeführte System ist das Halladaysche. Das Rad besteht aus 6, 8 und mehr einzelnen Teilen, welche wieder aus einer Anzahl schmaler, radialer, schräger Streifen fächerartig zusammengesetzt sind. Im Ruhezustande und bei schwachem Winde bilden dieselben eine zur Windrichtung senkrechte Ebene; der

Wind drückt gegen die schrägen Flächen und passiert zwischen den einzelnen Streifen; das Rad wird in Rotation gesetzt, und von der Welle wird die Kraft durch konische Zahnräder oder eine Kurbel weiter nach der Arbeitsmaschine übertragen. Abb. 838 zeigt ein auf eisernem Turme montiertes Windrad von Friedr. Filler in Hamburg, welches zum Betriebe der Pumpe für eine Eisenbahnwasserstation dient. Auch auf einem niedrigen Wagen transportabel werden solche Windräder gebaut, wie Abb. 839 zeigt; das Rad betreibt eine Baupumpe zur Entwässerung von Baugruben.

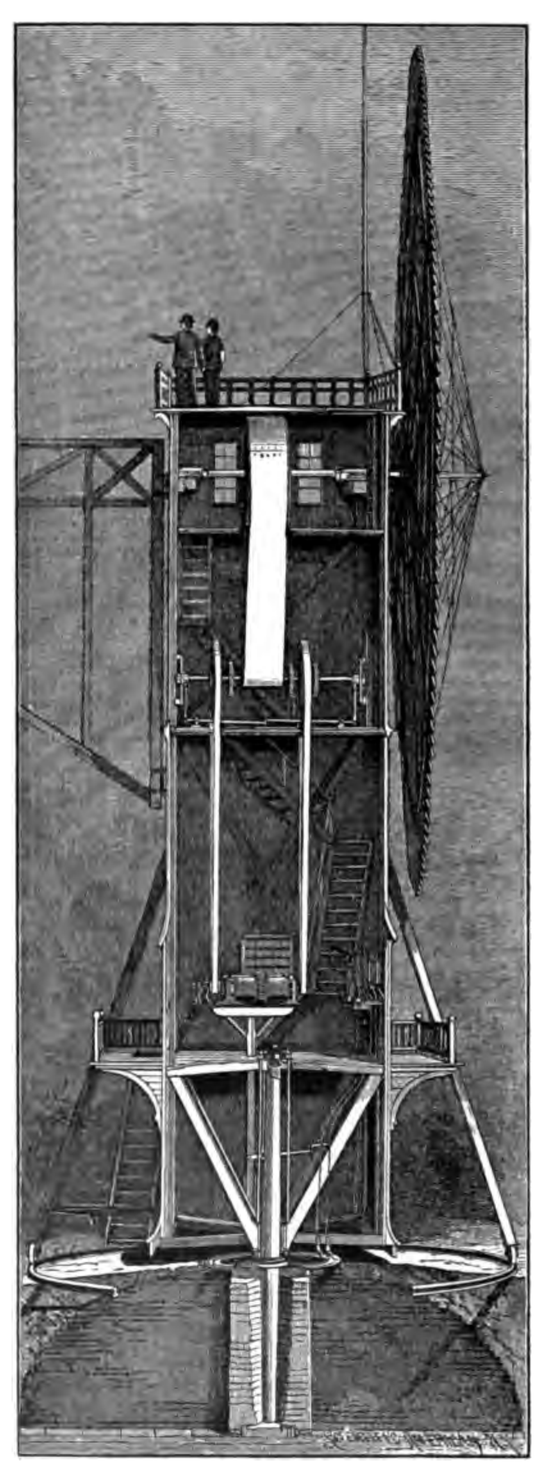
Die Einstellung der amerikanischen Windräder nach der Windrichtung geschieht durch einen Steuerungsflügel, der sich genau in die Windrichtung, also das mit ihm verbundene Rad senkrecht zum Winde stellt. Die Regulierung nach der Windstärke wird auf verschiedene Weise bewirkt. Die einzelnen Abteilungen des Rades sind jede um eine Achse A—A (s. Abb. 840 u. 841) drehbar und zwar so, daß sich der äußere Umfang nach hinten (in der Windrichtung) dreht; das Rad nimmt hierbei die in Abb. 741 skizzierte Form an. Wenn die Drehung 90 ° beträgt, so daß die einzelnen Felder und Leisten cylindrisch parallel um die Radwelle liegen, dann findet der Wind keine Angriffsfläche mehr, das Rad steht also in dieser Lage auch beim stärksten Winde still; je nach der Stellung zwischen dieser Lage und der Einstellung des Rades in ebener Fläche (wie Abb. 741) kann also die Druckfläche und damit die Leistung zwischen O und dem Maximum verändert werden.



840 u. 841. Reguliervorrichtung der amerikanischen Windräder.

Eine Art der selbstthätigen Einstellung besteht darin, daß die außerhalb der Drehachsen A A liegende Windfläche größer ist, als die innere; der Wind hat also außen einen gewissen Überdruck und sucht alle Teile um ihre Achsen in die Form der Abb. 841 zu verdrehen. Diesem Druck entgegen wirkt ein Gewicht, welches durch einen Winkelhebelmechanismus an den mit den Achsen A verbundenen Stangen B zieht und das Rad bei der Ruhe bis zu einer gewissen Windstärke in der ebenen Stellung hält. Bei stärkerem Winde übersteigt der äußere Überdruck auf das Rad die Wirkung dieses Gewichtes, und die einzelnen Abteilungen stellen sich mehr oder weniger schräg. Eine andere Reguliervorrichtung beruht auf der Zentrifugalkraft; sie soll eine gleichbleibende Umdrehungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Windstärken und verschiedener Leistung (innerhalb gewisser Grenzen) bewirken. Mit dem Rade schwingen Gewichte im Kreise herum; wenn bei wachsender Windstärke oder geringerer Arbeitsbeanspruchung das Rad sich schneller zu drehen beginnt, werden durch die vergrößerte Zentrifugalkraft von den Gewichten mittels Winkelhebelübertragung alle Abteilungen des Rades gleichmäßig nach außen gedreht; bis zu einer gewissen Umdrehungsgeschwindigkeit wird diese Wirkung aufgehoben, also das Rad geschlossen gehalten, durch ein anderes Gewicht, welches in umgekehrtem Sinne wirkt.

Windräder eignen sich außer zum Betriebe von Mahlmühlen, zu welchem Zwecke sie von jeher hauptsächlich angewendet wurden, besonders für kleineren bis mittleren Kraftbedarf in der Landwirtschaft, zum Betriebe von Pumpen zur Landbewässerung und Entwässerung, zur Trinkwasserversorgung für einzelne Gehöfte, Villen, Gärtnereien, sowie auch kleinere Gemeinden, als Betriebskraft für das Kleingewerbe z. B. kleinere mechanische Werkstätten, zum Betriebe von Sägen, Drehbänken u. s. w., wo keine Gasmotoren zur Anwendung kommen können. Der Hauptvorzug der Windmotoren liegt darin, daß die



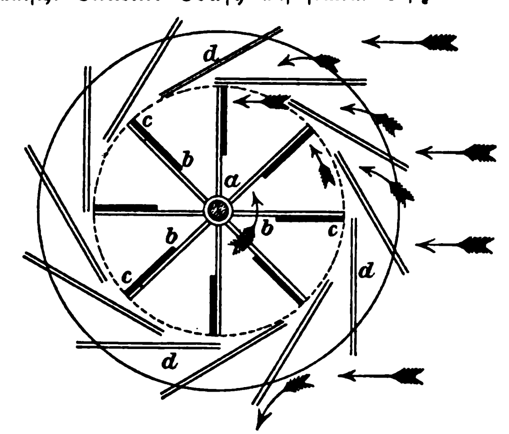
842. Amerikanisches Windrad zum Betriebe einer elektrischen Lichtmaschine (Schnitt). (Nach „Scientific American“.)

Kraft fast ohne Betriebskosten geliefert wird; es kommen, abgesehen von dem meist nicht bedeutenden Anlagekapital nur die Kosten für Schmierung der Lager, Gelenke u. s. w. und für etwaige Reparaturen in Betracht; einer besonderen Wartung bedürfen die sogenannten amerikanischen Windmotoren nicht. Ein Nachteil bleibt stets die Unsicherheit des Betriebes, welcher an das Vorhandensein von Wind von gewisser Stärke gebunden ist; damit eine Mahl-Windmühle wirtschaftlich vorteilhaft arbeiten könne, muß im Jahr etwa an 200 Tagen genügend Wind für vollen Betrieb herrschen. Die meisten Windräder brauchen, um überhaupt Arbeit leisten zu können, eine Windgeschwindigkeit von mindestens 4—5 m pro Sekunde, und erst bei 7 m Geschwindigkeit arbeiten sie mit voller Leistung; um also auch bei geringerer Windkraft die benötigte Leistung zu erzielen, empfiehlt es sich, von vornherein ein größeres Rad aufzustellen, welches schon bei etwa 5 m Windgeschwindigkeit genügende Kraft abgibt. Die Leistung der Windräder wächst nicht im direkten Verhältnis mit der Windgeschwindigkeit, sondern ungefähr mit der dritten Potenz derselben; ein Rad, welches bei 6 m Geschwindigkeit 1 Pferdestärke Arbeit abgibt, leistet also bei 8 m mehr als das doppelte, oder ein Windrad, welches bei der Windgeschwindigkeit von 7 m seine normale Leistung von 3 Pferdestärken hat, leistet bei 5 m nur noch 1 Pferdestärke.

Wegen der Unsicherheit des Betriebes empfiehlt es sich bei Windrädern sehr, wo es angängig ist, bei guten Windtagen Leistung aufzuspeichern, gleichsam „auf Vorrat zu arbeiten“; dies geht recht gut bei Pumpanlagen für Wasserversorgung, indem man ein Reservoir mit Wasser füllt, dessen Inhalt für den Bedarf von mehreren windstillen Tagen ausreicht. Solche Reservoire von nicht bedeutender Größe lassen sich vorteilhaft in dem Gerüst oder Turme des Windrades selbst in gewisser Höhe unterbringen; von dem Reser-

voir aus geht dann die Leitung unter Druck nach den tiefer gelegenen Verwendungsstellen. Die Pumpen zahlreicher Wasserstationen auf Eisenbahnen zum Füllen der Lokomotivtender werden durch Windräder betrieben (Abb. 838). Das Pumpwerk des Wasserwerks der Stadt Greifswald hat als Betriebskraft einen Fillerschen Windmotor; das Rad desselben hat zwei konzentrische Flügelkränze mit einem äußeren Durchmesser von 12 m. Bei 7 m Windgeschwindigkeit beträgt die Arbeitsleistung 18 Pferdestärken. Im Jahresdurchschnitt werden mit 4,8 m Windgeschwindigkeit stündlich 162 cbm Wasser auf 6 m Förderhöhe gepumpt. Für die Aufstellung von Windrädern ist die Wahl eines geeigneten Platzes wichtig; am besten stehen Windmühlen in weiter freier Ebene, oder bei unebenem Terrain auf natürlichen Höhen; wo diese Bedingungen nicht vorhanden sind, muß das Rad auf einem genügend hohen Turm oder Gerüst aufgestellt werden. In der Nähe sollen auf etwa 100 m Entfernung keine höheren oder annähernd eben so hohen Gebäude, Baumgruppen oder Terrainerhöhungen sich befinden, damit von allen Seiten der Wind frei zuströmen kann.

Hier und da, bisher allerdings nur vereinzelt, hat man Windräder zum Betriebe elektrischer Lichtmaschinen angewendet. Eine größere Anlage solcher Art mit einem riesigen Windrad hat der hervorragende amerikanische Elektriker Brush auf seinem Besitztum in Cleveland (Ohio) ganz nach eigenen Plänen und unter seiner persönlichen Leitung vor einigen Jahren errichtet. In dem Parke erhebt sich der 18 m hohe, quadratische eiserne Turm, der das Rad trägt; dasselbe hat 17 m äußeren Durchmesser und besteht aus 144 einzelnen schräg gestellten und gekrümmten Blättern, die gruppenweise zu Sektoren zusammengefaßt sind; Abb. 842 ist ein Vertikalschnitt durch den Turm mit dem Rade in seitlicher Stellung. Die Gesamtwinddruckfläche beträgt 160 qm; durch einen 18 m langen Steuerungsflügel dreht sich das Rad mit dem ganzen Turm um eine zentrale Achse, hierbei wird der Turm durch vier starke seitliche Streben gestützt, die mit kleinen Rädern auf einem Ringgeleise laufen. Die Einstellung der Druckfläche nach der Windstärke geschieht automatisch. Die Bewegung der Hauptwelle des Rades wird durch einen breiten Riemen nach unten auf ein Vorgelege übertragen, und von diesem aus wird durch zwei Riemen die in einer tieferen Etage stehende Dynamomaschine angetrieben. Die Umdrehungszahl der Dynamowelle ist durch die doppelte Riemenübertragung auf das Fünfzigfache derjenigen der Windradwelle gesteigert und beträgt 800 pro Minute; die Leistung ist bei voller Inanspruchnahme 12 000 Watt. Die Dynamomaschine speist eine Akkumulatorenbatterie aus 408 Zellen, durch welche ihre Leistung in der bekannten Weise reguliert wird, indem sie die Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch von elektrischem Strome ausgleicht; während des Tages, bei geringem Stromkonsum, wird elektrische Energie in dem Akkumulator aufgespeichert, welche abends sowie an windstillen Tagen, wenn das Windrad nur mit geringerer Leistung oder gar nicht arbeitet, den Lichtbedarf deckt. Die Anlage speist für die Beleuchtung des Hauses 350 Glühlampen, von denen gewöhnlich 100 gleichzeitig brennen, und außerdem 2 Bogenlampen und 3 Elektromotoren. Die auf diese Weise mittels der „kostenlosen“ Windkraft erzeugte Beleuchtung ist übrigens keineswegs so billig, wie man wohl annehmen könnte; der eigentliche Kraftbetrieb kostet allerdings nur sehr wenig, da das Windrad nur geringer Wartung bedarf; aber die Anlage ist so kostspielig, daß hierdurch der Vorteil der billigen Betriebskraft mehr als aufgewogen wird; außerdem ist der Betrieb der notwendigen, verhältnismäßig sehr großen Akkumulatorenbatterie teuer.



843. Altes horizontales Windrad.

Schon vor 200 Jahren wurden Versuche gemacht, horizontale Windräder zu konstruieren, deren Flügel also um eine vertikale Achse sich drehen. Der Grund hierfür war derselbe, der noch jetzt besteht, daß nämlich solche Windräder nicht nach dem Winde gestellt zu werden brauchen, sondern ohne Änderung der Achsenstellung bei jeder Windrichtung laufen. Dieser Vorteil wird aber durch andere Nachteile mehr als aufgehoben; die nutzbar wirksame Druckfläche ist nämlich bei Windrädern von vertikaler Achse stets kleiner als bei den gewöhnlichen Windmühlen von gleicher Flügelfläche und die Grund-

bedingung, daß der Wind stets nur oder doch überwiegend auf einer Seite der Achse angreift, wodurch erst eine Wirkung ermöglicht wird, da sonst die Winddrucke auf beiden Hälften des Rades sich aufheben, ohne Arbeit zu leisten, führt zu mehr oder weniger komplizierten Konstruktionen. Abb. 743 zeigt schematisch eine derartige alte Anordnung im Grundriß; a ist die vertikale Welle, an der mittels der Arme b die senkrechten Flügel c befestigt sind. Das Rad ist umgeben von einem Kranze feststehender schräger Leitflächen d, welche bei irgend einer Richtung des Windes letzteren an der einen Seite, wie die Pfeile andeuten, in das Rad und gegen die Flügel strömen lassen, während er auf der entgegengesetzten Seite abgelenkt wird. Bei einer anderen, ganz sinnreich ausgedachten Konstruktion wurden durch ein Zahnradwerk die Flügel während der Rotation derart gedreht, daß sie auf der einen Seite dem Winde stets ihre volle Fläche, auf der anderen aber ihre schmale Kante entgegenstellten, so daß der Winddruck nur auf der einen Seite der Achse wirksam war. In neuerer Zeit sind unter dem Namen **Windturbinen** vertikale Windräder konstruiert worden, welche im Prinzip mit der in Abb. 843 dargestellten Anordnung übereinstimmen, aber durch verbesserte Form der Leitflächen und der Flügel den Windstoß beim Eintritt in das Rad und damit den Kraftverlust verringern. Es sind einige solche Windturbinen ausgeführt worden, doch haben sie sich nicht in größerem Umfange einzuführen vermocht und gegenüber den neueren amerikanischen Windrädern werden sie kaum noch Bedeutung erlangen können.

Die Ausnützung der Windkraft durch Windräder für großen Kraftbedarf ist bei den jetzigen technischen und wirtschaftlichen Verhältnissen und auch für die nächste Zukunft aussichtslos. Sehr wahrscheinlich werden die Windräder noch in viel umfangreicherem Maße als bisher angewendet werden, aber stets wird ihre Anwendung nur für besondere Verhältnisse vorteilhaft sein; eine Verwendung derselben zur Kraftversorgung in großem Maßstabe kann nicht stattfinden.

Wasserkraftmaschinen und Ausnutzung der Wasserkräfte.

Allgemeines. Wasserräder. Turbinen. Wassersäulenmaschinen. Ausnutzung der Wasserkräfte.

Alle **hydraulischen** Motoren oder Maschinen zur Ausnutzung von Wasserkräften d. h. zur Umwandlung und Übertragung der im fließenden Wasser enthaltenen Energie in nutzbare mechanische Arbeit, zum Betriebe von Arbeitsmaschinen, lassen sich in zwei Hauptgruppen einteilen: in **Wasserräder** und **Wassersäulenmaschinen**. Bei ersteren erteilt das bewegte Wasser einem auf einer Welle sitzenden Rade eine kontinuierliche Rotation, während bei letzteren das Wasser in einem Cylinder drückend auf einen in demselben dicht schließenden Kolben wirkt und eine geradlinige Hin- und Herbewegung desselben erzeugt. Bei den Wasserrädern machte man früher allgemein und macht man auch jetzt noch vielfach die rein äußerliche Unterscheidung in vertikale und horizontale Wasserräder; erstere, auch kurzweg **Wasserräder** in engerem Sinne genannt, drehen sich um eine horizontale Welle; während letztere, die **Turbinen**, eine vertikale Drehachse haben. Dem Prinzip der Wirkungsweise entsprechend macht man aber in neuerer Zeit eine andere und bessere Einteilung, bezw. gibt den Bezeichnungen Wasserrad und Turbine eine andere Bedeutung. Bei den Wasserrädern wirkt hiernach das Wasser allein oder vorzugsweise durch sein Gewicht, bei letzteren nur durch seine lebendige Kraft und zwar durch Druck oder Reaktion. Diese Unterscheidung wird indessen nicht überall konsequent durchgeführt, indem man z. B. das Poncelet-Rad, bei welchem, wie wir später sehen werden, das Wasser hauptsächlich durch Druck, ähnlich wie bei den Turbinen, arbeitet, doch allgemein zu den Wasserrädern rechnet. Dagegen muß z. B. das vertikale Pelton-Rad unbedingt zu den Turbinen gezählt werden.

Wie alle Kraftmaschinen, so können auch die Wasserräder selbst bei den günstigsten Umständen und der besten Konstruktion niemals die in dem zugeführten Betriebswasser enthaltene Kraft, welche sich aus der Wassermenge und seinem Gefälle, d. i. dem Unterschied des Wasserspiegels im Zufluß und Abflußgerinne berechnet, ganz ausnützen; abgesehen von den Reibungsverlusten der Welle kommt nie alles Wasser zur vollen Geltung,

es geht Wasser durch Undichtigkeiten verloren, und durch den Wasserstoß beim Eintritt in das Rad, sowie durch Wirbelbewegungen wird Energie für die praktische Ausnutzung vernichtet. Wie bei allen Kraftmaschinen wird die nach Abzug aller Verluste übrig bleibende Arbeit, also die direkt von der Welle nützbar abgegebene Kraft als effektive Leistung und das Verhältnis zwischen dieser und der aus der Wassermenge und dem Gefälle sich ergebenden theoretisch möglichen Leistung, als Bruch oder in Prozenten ausgedrückt, als Wirkungsgrad oder Nutzeffekt bezeichnet. Das Gefälle wird in Metern, die Wassermenge in Sekundenlitern (sl) oder bei größeren Mengen in Sekundenkubikmetern (scbm) — d. i. die Anzahl Liter bzw. Kubikmeter, die in der Sekunde zur Wirkung kommen — bezeichnet. Ist die Wassermenge einer auszunutzenden Wasserkraft Q in Kubikmetern pro Sekunde und die Gefällshöhe H, so ist die theoretische Leistungsfähigkeit, ganz gleichviel, welche Art hydraulischer Maschinen zur Ausnutzung angewendet werden, $Q \cdot 1000\,H$ Sekundenmeterkilogramm oder $\frac{Q \cdot 1000\,H}{75}$ Pferdestärken.

Für alle Wasserkraftanlagen ist es von größter Wichtigkeit, vor der Ausführung als Grundlage für den Entwurf genau die Wassermenge zu bestimmen, auf die man mit Sicherheit rechnen kann. Diese Bestimmung ist in vielen Fällen gar nicht einfach, und für große Anlagen sind oft jahrelange vorherige Messungen notwendig, da die Wassermenge von Quellen oder Flüssen nicht nur in jedem Jahre mit den Jahreszeiten, sondern auch im Laufe der Jahre sehr verschieden ist. Schon manche Anlage hat sich, nachdem sie auf ungenügenden Grundlagen projektiert und ausgeführt worden war, später als verfehlt erwiesen, indem wegen ungenügender Wassermenge die hydraulischen Maschinen während längerer Zeit nicht mit voller Leistung arbeiten konnten. Wo die örtlichen Verhältnisse der Bodengestaltung günstig sind, kann man die Schwankungen der zufließenden Wassermenge dadurch ausgleichen, daß man das Wasser in großen Vorratsbassins sammelt, also den Wasserüberschuß während der Zeit großen Zuflusses für die Monate mit ungenügendem Zufluß aufspart. Dies geschieht z. B. durch Benutzung natürlicher Seebecken oder durch künstlich hergestellte Sperrdämme, mit denen man ein Flußthal absperrt, so daß sich oberhalb ein See mit großem Wasserinhalt bildet.

Bei allen Wasserkraftanlagen — mit wenigen Ausnahmen, bei denen ein Wasserrad direkt in einem Flusse selbst arbeitet — ist für den Zufluß des Wassers ein Zuflußgerinne, Zuleitungskanal (Obergraben) oder eine Zuflußrohrleitung und ein Abflußkanal (Untergraben) erforderlich. Der Fluß wird durch einen quer durchgelegten Damm, das Wehr, abgesperrt, so daß das Wasser in dem Zuflußgerinne durch die Maschine fließen muß. Zur Regulierung der Wassermenge dienen Schützen, welche im Zuflußgerinne liegen oder bei Zuleitung durch geschlossene Rohrleitungen Schieber, die für verschiedene Durchflußmengen eingestellt werden können. Ein Leerlauf dient zur Abführung des überschüssigen Wassers. Untergraben und Leerlauf münden in den Unterlauf des Flusses.

Die Frage, welcher der drei obengenannten hydraulischen Kraftmaschinen zur Ausnutzung einer Wasserkraft der Vorzug zu geben ist, kann nicht allgemein, sondern nur in jedem einzelnen Falle durch Abwägung der besonderen Verhältnisse, welche für den einen oder andern Motor günstig sein können, und unter Berücksichtigung des Zweckes, welchem er dienen, also welche Arbeit er verrichten soll, entschieden werden. Wassersäulenmaschinen kommen verhältnismäßig wenig und nur für besondere Zwecke in Anwendung. Die Wasserräder stehen im allgemeinen bezüglich des Nutzeffektes hinter den Turbinen zurück. Bei letzteren kann man bei dem heutigen Stande der Spezialtechnik auf einen Wirkungsgrad von 80% und mehr rechnen, während Wasserräder meist einen viel niedrigeren Nutzeffekt haben. Nur sehr gut ausgeführte große oberschlächtige Wasserräder erreichen unter günstigen Verhältnissen einen Wirkungsgrad von 80% und darüber. Wasserräder arbeiten im allgemeinen mit geringer Umdrehungsgeschwindigkeit, wenn sie einen guten Nutzeffekt haben sollen; es müssen deshalb meist zwischen der Welle und den schneller laufenden Arbeitsmaschinen Übersetzungen eingeschaltet werden; Turbinen laufen dagegen mit viel größerer Geschwindigkeit, weshalb sie sich besonders zum Antrieb schnell laufender Maschinen, die direkt von der Welle betrieben werden können, besser eignen.

Für eine bestimmte Leistung sind Wasserräder größer und schwerer als Turbinen; sie beanspruchen mehr Platz und sind überdies meistens teuerer als letztere. Turbinen haben im Winter nur in seltenen Fällen bei ungünstigen Verhältnissen von Eis zu leiden, wogegen bei den Wasserrädern durch Eisbildung leicht der Betrieb unterbrochen und die Radschaufeln beschädigt werden können. Aus allen diesen Gründen haben in neuerer Zeit, seit der bedeutenden Vervollkommnung der Turbinen, letztere besonders für größere Gefälle von 10 m und mehr, die Wasserräder immer mehr verdrängt; für einigermaßen große Anlagen kommen letztere nur noch ausnahmsweise zur Anwendung. Immerhin haben aber in besonderen Fällen auch die Wasserräder ihre Vorzüge; wenn z. B. bei einer vorhandenen Anlage ein Wasserrad unbrauchbar geworden ist, kann die Beschaffung eines neuen Rades vorteilhaft sein, da die übrigen Einrichtungen, die Gerinne, Schützen u. s. w. unverändert benutzt werden können. Für kleinere Gewerbebetriebe, wie kleinere Mahl- und Sägemühlen, haben sie, besonders in abgelegenen Gegenden, den Vorteil, daß Reparaturen leichter von dem Besitzer oder Handwerkern am Orte bewirkt werden können, ohne umständliche und meist kostspielige Zuziehung von Maschinenfabriken, welche bei Defekten an eisernen Turbinen meist nicht zu umgehen ist. Bei weit von den Industriestädten abgelegenen Gegenden, ohne Eisenbahn- oder Wasserverbindung, mit schlechten Transportverhältnissen, z. B. im Gebirge ist die Aufstellung von Turbinen schwierig, dagegen können hölzerne Wasserräder aus vorhandenem Material von einheimischen Handwerkern ausgeführt werden.

Die Wasserräder.

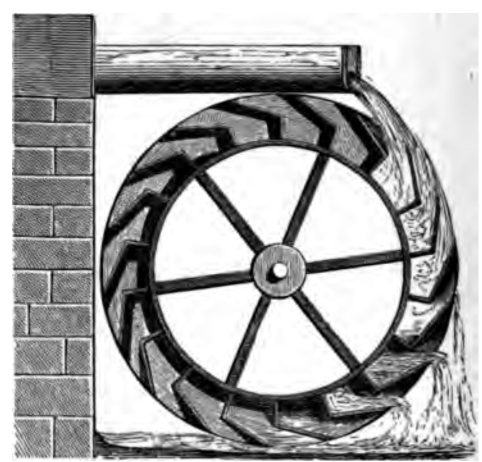
Geschichtliches. Einteilung der Wasserräder. Oberschlächtige Räder. Rückenschlächtige Räder. Großes Wasserrad der Laxey-glen-mines. Unterschlächtige Räder. Poncelet-Rad. Kropfräder. Zuppingerrad. Schiffsmühlenräder. Kolben- und Kettenräder.

Der Erfinder der Wasserräder ist ebenso wie derjenige der Windmühlen nicht bekannt: wahrscheinlich wurden sie in verschiedenen Ländern zu verschiedener Zeit wiederholt erfunden. Es ist nachgewiesen, daß sie sehr alt sind und wahrscheinlich zuerst in Ägypten, Assyrien, sowie später in Griechenland und Rom in Verbindung mit Wasserschöpfmaschinen angewendet worden sind. Aus der Mitte des Jahrhunderts vor Christi Geburt haben wir Mitteilungen über verschiedene Wasserräder in Kleinasien und Rom. In einem Werke des zur Zeit des Kaisers Augustus lebenden römischen Baumeisters Vitruvius findet sich eine Beschreibung der damals benutzten Wasserräder: „An den Stirnseiten von Rädern werden Schaufeln befestigt, welche von dem Stoße des fließenden Wassers bewegt, die Umdrehung des Rades bewirken. Indem sie so das Wasser in Kasten schöpfen und zur höchsten Höhe führen, leisten sie ohne Tretarbeit der Tagelöhner, (also anstatt von Menschen bewegter Treträder) vielmehr durch die Wirkung des Wassers selbst, das, was zum Gebrauche nötig ist. Auf dieselbe Weise bewegen sich auch Getreidemühlen u. s. w.“ Diese Wassermühlen lagen außerhalb der Stadt Rom an den Kanälen, welche der Stadt das Trinkwasser zuführten. Es müssen unterschlächtige Räder gewesen sein, welche nur am unteren Teile des Umfanges von dem mit geringem Gefälle fließenden Wasser getroffen wurden, und ihre Leistung kann nur gering gewesen sein. Bei der damaligen billigen Sklavenarbeit war dies auch wohl der Grund, daß die Wassermühlen sich nur langsam verbreiteten und noch lange Zeit allgemein die Hand- und Tiermühlen in Gebrauch blieben. Als zur Zeit des Kaisers Justinian die Ostgoten zwei Jahre lang vergeblich Rom belagerten und die 14 großen gemauerten kostbaren Wasserleitungen, welche in der Stadt die Wasserräder betrieben, außerhalb verstopften, half sich der berühmte Feldherr des Kaisers, Belisar, in der Weise, daß er die Mühlen auf Fahrzeuge setzen und auf den Tiber bringen ließ, wo sie direkt vom Strome, ohne Wehre oder Gerinne betrieben wurden: wir haben hier die erste Anwendung der Schiffsmühlen.

Die ersten Nachrichten über Wassermühlen in Deutschland haben wir aus dem Ende des 4. Jahrhunderts n. Chr.; mehrere Jahrhunderte hindurch scheinen sie aber noch wenig bekannt und angewendet geblieben zu sein; im 11. und 12. Jahrhundert dagegen sind

sie bestimmt in Deutschland und Frankreich schon allgemein verbreitet gewesen. Gegen Mitte des 11. Jahrhunderts sollen in Venedig Wasserräder in Benutzung gewesen sein, die nicht von einem Flusse, sondern von der Flut und Ebbe des Meeres betrieben wurden; die in neuester Zeit hier und da vorgeschlagene Idee, die ungeheuere Kraft von Ebbe und Flut nutzbar zu machen, ist hiernach keineswegs neu.

Im Anfang des 17. Jahrhunderts fing man an, die Wirkungsweise und Konstruktion der Wasserräder wissenschaftlich zu behandeln Aber erst gegen Mitte des 18. Jahrhunderts kam man auf den richtigen Weg und zu brauchbaren Resultaten; man erkannte, daß dieselbe Wassermenge bei demselben Gefälle eine viel größere Leistung ausübt, wenn sie durch ihr Gewicht anstatt durch Stoß wirkt, daß also oberschlächtige Räder den unterschlächtigen vorzuziehen sind. Da aber unterschlächtige Räder die Vorteile größerer Einfachheit, größerer Umdrehungsgeschwindigkeit und geringerer Größe für gleiche Leistung gegenüber den oberschlächtigen Rädern haben, so war man eifrig bemüht, unterschlächtige Räder so zu konstruieren, daß das Wasser möglichst ohne Stoß, vorwiegend durch Druck wirke. Erst 1825 gelang dies dem französischen Ingenieur Poncelet, welcher die unterschlächtigen Räder mit gekrümmten Schaufeln versah; er brachte hiermit ganz neue Prinzipien in die Wasserradkonstruktion. Vor 50 Jahren wurde, hauptsächlich von deutschen Ingenieuren, unter denen besonders Weisbach und Redtenbacher zu nennen sind, die frühere Theorie der Wasserräder von Grund auf neu entwickelt, bereichert und berichtigt; jetzt ist die Konstruktion der Wasserräder seit längerer Zeit vollständig sicher auf wissenschaftlicher Basis und praktischen Erfahrungen begründet.

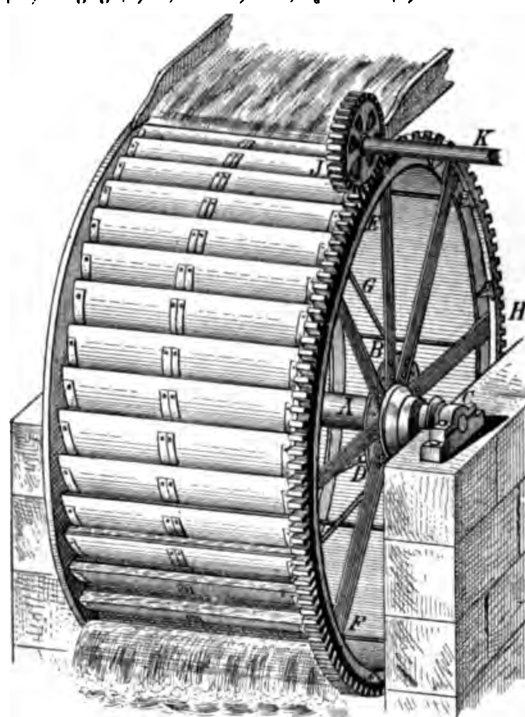

844. Oberschlächtiges Wasserrad.

Einteilung der Wasserräder. Je nach der Lage des Wassereinlaufs teilt man die Wasserräder nach der besonderen Konstruktion des Wassereinlaufs und der Schaufeln der Zellen ein in oberschlächtige, mittel- oder rückenschlächtige und unterschlächtige Räder; ferner unterscheidet man noch mittelschlächtige und halbmittelschlächtige Räder, je nachdem der Punkt, bei welchem das Wasser eintritt, ungefähr in der Höhe der Achse oder zwischen dieser und dem tiefsten Punkte liegt. Bei denselben wird das Rad von der Einlaufstelle des Wassers bis zum untersten Punkte von einem konzentrischen, das Rad nahe umfassenden Mantel, dem Kropfe, umgeben, damit das Wasser nicht gleich aus den Schaufeln ausfließen kann; man bezeichnet solche Räder deshalb auch mit dem gemeinsamen Namen Kropfräder. Schließlich hat man noch verschiedene Unterabteilungen.

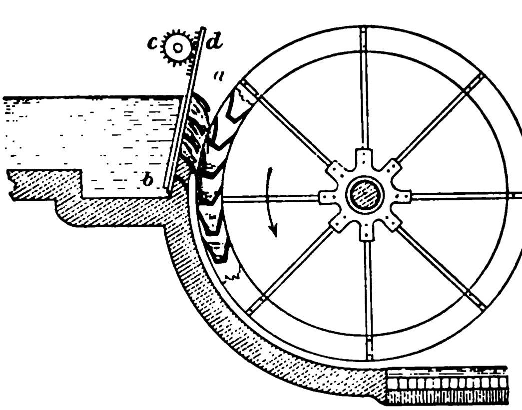
Bei oberschlächtigen Wasserrädern erfolgt der Wassereintritt beim oder nahe unter dem Scheitel des Rades, und der Unterwasserspiegel darf eben den unteren Radumfang berühren; der Durchmesser des Rades ist also gleich der Gefällshöhe, woraus hervorgeht, daß diese Räder nicht für große Gefälle verwendet werden können, da sie sonst zu große Dimensionen erhalten. Das Wasser wirkt hauptsächlich durch sein Gewicht, indem es oben mit geringer Geschwindigkeit, also ohne oder mit geringer Stoßwirkung in die am Umfang angebrachten zellenförmigen Schaufeln läuft, das Rad an der einen Seite belastet und so in Drehung bringt und dann unten ausläuft. Das Zuleitungsgerinne wird bis über den Radscheitel geführt; die Regulierung geschieht durch Schützen einfachster Art. Abb. 845 stellt ein eisernes Rad neuerer Konstruktion dar. Die Radarme BE, BF, BH u. s. w. sind durch Schrauben mit Scheiben oder Rosetten BD fest verbunden, welche auf der Welle AC sitzen. Die Räder werden in der Regel sehr breit gemacht und erhalten deshalb zur Versteifung noch einen mittleren Armkranz; auf den äußeren Radkranz ist ein Zahnrad

aufgesetzt, das in ein kleineres, auf der Welle J sitzendes Rad K eingreift, von wo aus die Arbeit an die Transmission übertragen wird. Der Wirkungsgrad kann bis 80% betragen.

Bei den rückenschlächtigen Rädern tritt das Wasser in der Höhe der Achse oder am oberen Teile des Umfanges, doch unterhalb des Scheitels, in das Rad. Die Einführung geschieht durch Schützen verschiedener Art; Abb. 846 zeigt ein rückenschlächtiges Wasserrad mit Coulisseneinlauf; der Schütze b d hat eine Anzahl gebogener Leitschaufeln a, zwischen denen das Wasser in die kübelartigen Zellen strömt; je nach der Wassermenge werden durch Verstellung des Schützen mittels des Zahnrades c, welches in das obere verzahnte Ende des Schützen eingreift, mehr oder weniger der durch die Coulisse a gebildeten Kanäle für den Einlauf geöffnet; zwischen den Rückseiten der Zellen müssen Öffnungen oder Spalten gelassen werden, aus denen beim Einströmen des Wassers die Luft entweichen kann; das Rad muß „ventiliert“ werden. Die rückenschlächtigen Räder haben zwar einen geringeren Wirkungsgrad, als gute oberschlächtige, für gewöhnlich etwa 65—70%; sie sind letzteren aber bei sehr wechselnden Aufschlagwassermengen vorzuziehen, da bei solchen oberschlächtige Räder nicht günstig arbeiten können.



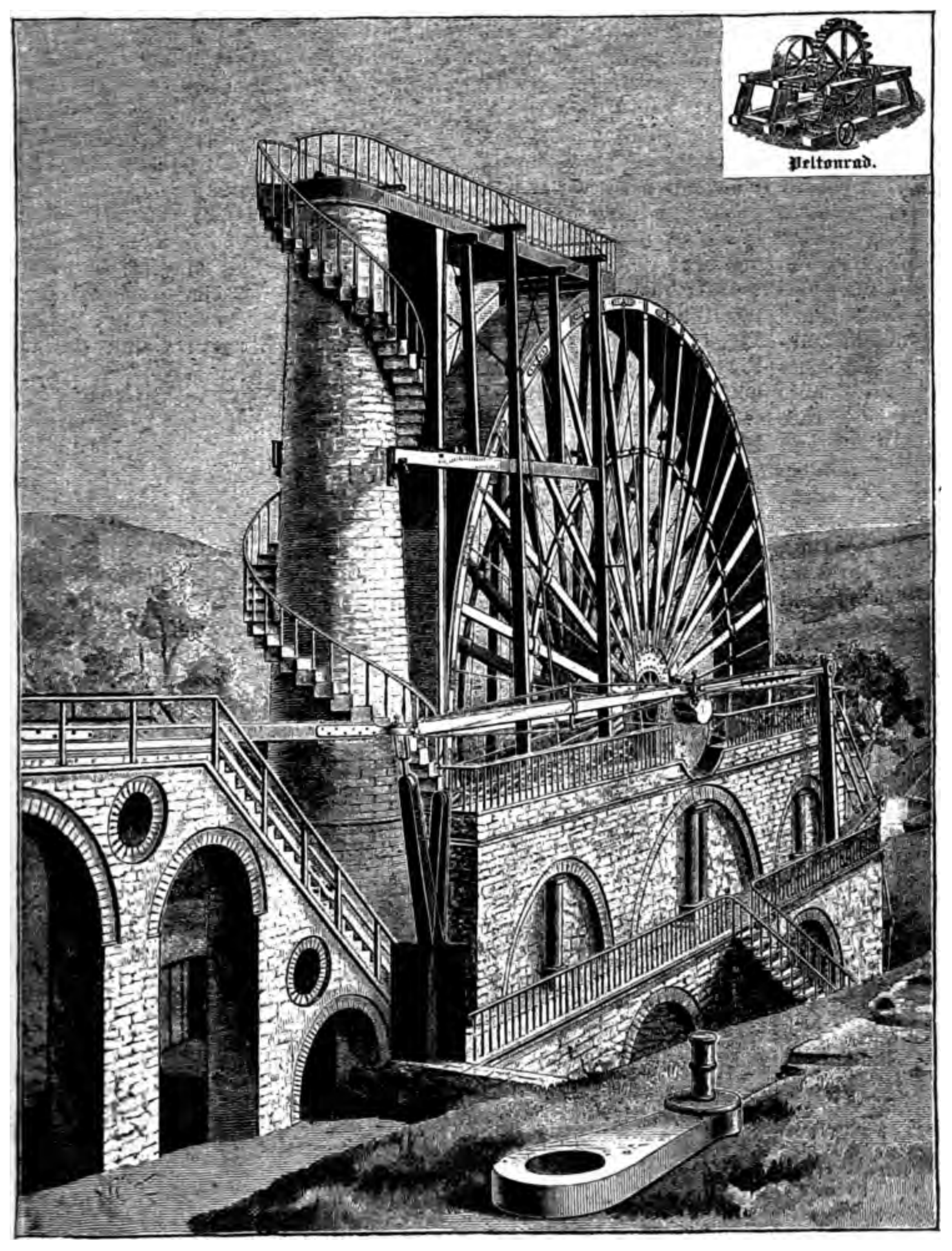
845. Eisernes oberschlächtiges Wasserrad.



846. Rückenschlächtiges Wasserrad.

Eins der größten Wasserräder der Welt ist ein rückenschlächtiges Rad, das bei Greenock in Schottland, am Ausflusse des Clyde, eine große Baumwollspinnerei betreibt. Das kolossale Rad ist ganz aus Eisen hergestellt und hat 21,35 m Durchmesser und $3^1/_2$ m Breite; es arbeitet mit 1 cbm Wasser pro Sekunde mit 19,5 m Gefälle und macht pro Minute nur $1^1/_2$ Umdrehung. Ein noch etwas größeres rückenschlächtiges Wasserrad ist das in Abb. 847 dargestellte, welches zum Betrieb der Wasserhaltungspumpen der Laxey-glen-mines an der Ostküste der Insel Man (England) dient. Dasselbe hat 22 m Durchmesser und 1,80 m Radkranzbreite; das Betriebswasser wird aus der die Insel durchziehenden Bergkette in einem Reservoir gesammelt und durch einen unterirdischen Kanal herbeigeführt, es steigt in einem Turme in die Höhe und fließt aus diesem in einem Gerinne in die Zellen des Rades. Die Leistung beträgt bei einer Umdrehung pro Minute 200 Pferdestärken; von der Radwelle wird durch eine Kurbel ein Gestänge betrieben, welches durch ein Kunstkreuz (Winkelhebel) das Pumpengestänge der zwei Wasserhaltungspumpen bewegt; letztere fördern pro Minute $6^1/_2$ cbm Wasser aus 120 m Tiefe.

Die einfachste und konstruktiv am wenigsten ausgebildete und deshalb wenig vorteilhafte Art der unterschlächtigen Wasserräder sind diejenigen mit geradem Gerinne und geraden Schaufeln. Abb. 848 stellt ein solches schematisch dar. Das Wasser wirkt

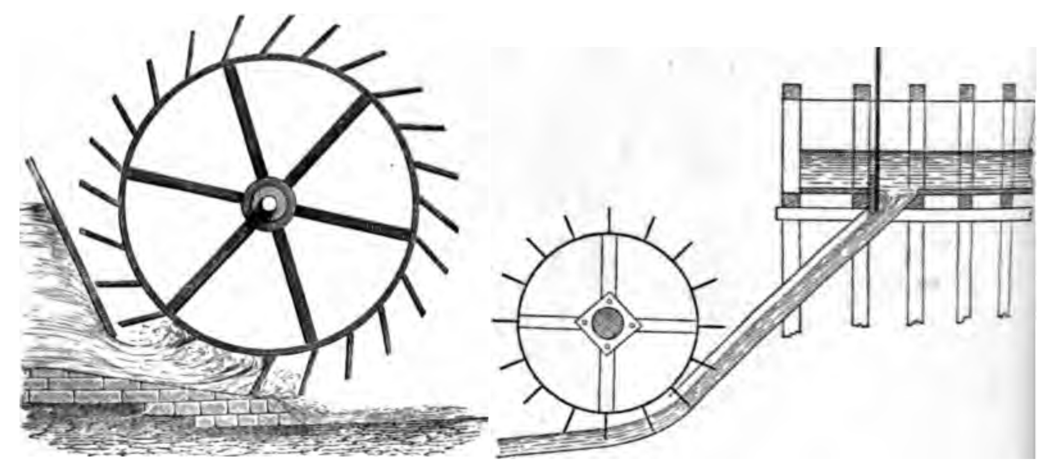


847. Wasserrad der Laxey-glen-mines auf der Insel Man (England).
In der oberen rechten Ecke ein Peltonrad (s. S. 649) von gleicher Leistung, im selben Maßstab gezeichnet.
(„Scientific American“.)

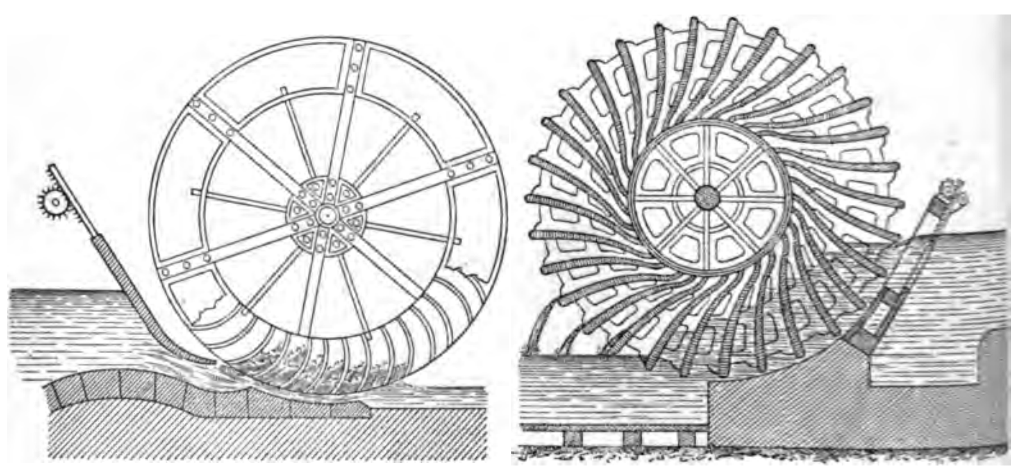
bei diesen rein unterschlächtigen Rädern nur durch Stoß; hierdurch ist der Wirkungsgrad auch bei bester Anordnung und Ausführung stets gering, nur 30—35 %. Etwas günstiger wird die Wirkung bei geraden Schaufeln, wenn das Gerinne beim Rade gekrümmt wird, wie bei den sogenannten Hammerrädern (s. Abb. 849); das Wasser wirkt dann wenigstens zum Teil durch sein Gewicht. Solche Räder mit gekrümmtem Gerinne sind seit langer Zeit zum Betriebe kleinerer Hammerwerke benutzt worden, besonders in gebirgigen Gegen-

den, wo Wasserkräfte mit überschüssiger Wassermenge zur Verfügung stehen; sie haben vor den oberschlächtigen Rädern den Vorteil größerer Umdrehungsgeschwindigkeit. Auch jetzt noch sind solche einfache Räder in gebirgigen, von den Industriestädten weit abgelegenen Gegenden z. B. in Mitteldeutschland und besonders Steiermark zum Betriebe kleiner Hammerschmieden in Benutzung.

Wenn eine Wasserkraft von $\frac{1}{2}$—$1\frac{1}{2}$ m Gefälle möglichst ausgenutzt werden soll, und eine hohe Umdrehungszahl verlangt wird, so ist die beste Konstruktion eines vertikalen Wasserrades diejenige von Poncelet. Das **Poncelet-Rad** (Abb. 850) hat ge-



848. Unterschlächtiges Wasserrad mit geraden Schaufeln. 849. Hammerrad.



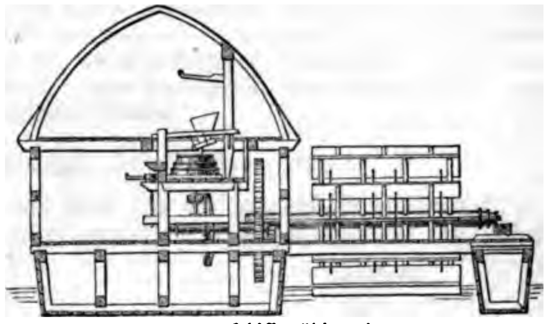
850. Poncelet-Rad. 851. Zuppinger-Rad.

krümmte Schaufeln, einen nach einer bestimmten Kurve gekrümmten Gerinnboden und einen schrägen, dem Rade möglichst nahe gestellten Schützen; hierdurch wird das Wasser dem Rade in möglichst vorteilhafter Weise zugeführt; es tritt zwischen dem Gerinnboden und dem Schützen in genau bestimmter Richtung ohne Stoß zwischen die Schaufeln, steigt an diesen in die Höhe und überträgt hierbei seine lebendige Kraft an das Rad. Bei guter Anordnung und richtiger Konstruktion kann ein Wirkungsgrad von 60—70% erreicht werden. Der Schütze wird durch ein in das obere verzahnte Ende desselben eingreifendes Zahnrad mittels Kurbel verstellt.

Die **Kropfräder** werden in sehr verschiedener Weise konstruiert mit geraden und gekrümmten Schaufeln, mit Durchlaß-, Überfall- und Coulissenschützen; letztere haben wir

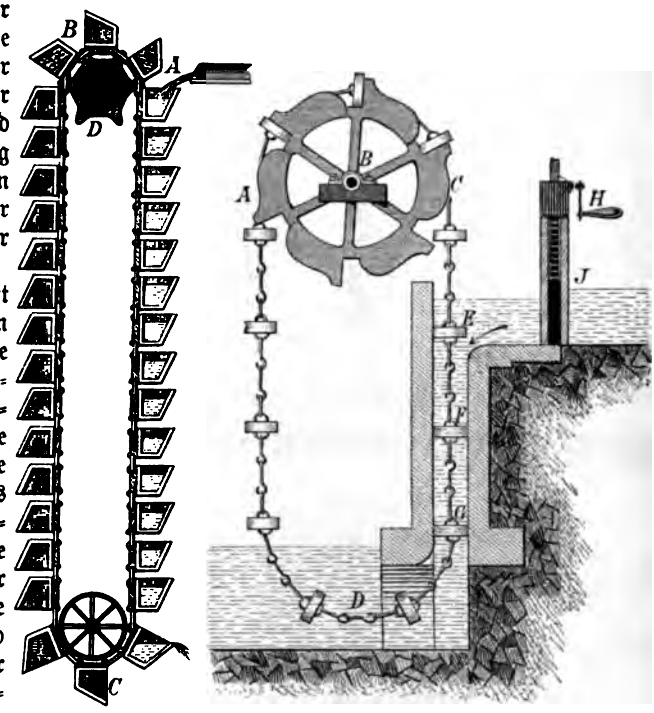
schon früher kennen gelernt. Durchlaßschützen sind solche, bei denen Wasser unter dem Schützen durchströmt (wie in Abb. 850), während es bei den Überfallschützen über die Oberkante derselben einläuft. Abb. 851 stellt das nach seinem Konstrukteur benannte Zuppinger-Rad mit Überfallschützen dar; dasselbe eignet sich besonders für Wasserkräfte mit geringem Gefälle.

Zu den unterschlächtigen Wasserrädern gehören auch die **Schiffsmühlenräder**, welche direkt vom freien Strome getrieben werden und, wie oben erwähnt, bereits im 6. Jahrhundert von Belisar auf dem Tiber angewendet wurden. Sie finden jetzt nur noch vereinzelt auf größeren Strömen Anwendung. Abb. 852 stellt ein solches dar; ein breites, flaches Schiff, welches im Strome fest verankert wird, trägt ein hölzernes Häuschen mit einem Mahlwerk; seitlich ragt die Welle des Rades heraus, welches am anderen Ende auf einem besonderen, daneben liegenden, mit dem Hauptschiff durch Balken fest verbundenen Schwimmkörper gelagert ist. Das Rad taucht mit der Schaufelbreite in das Wasser und wird von der Strömung umgetrieben; die Durchmesser solcher Räder betragen $3\,^1/_2$—7 m, bei einer Breite von $2\,^1/_2$—$4\,^1/_2$ und sogar $5\,^1/_2$ m. Die Leistung derselben ist selbst bei großen Dimensionen und bei starker Strömung gering, eine oder weniger Pferdestärken.



852. Schiffsmühlenrad.

Eine eigentümliche Art von vertikalen Wasserrädern sind schließlich noch die **Kettenräder** und **Kolbenräder**. Ein **Eimerkettenrad** zeigt Abb. 853; wie diese darstellt, ist dasselbe gleichsam die Umkehrung des früher (ersten Abschnitt) besprochenen Schöpfrades; die Gefäße A B C sind an einer Gliederkette befestigt, die über die Welle D läuft, und durch das Wassergewicht der an der einen Seite gefüllten Kästen wird die Welle in Drehung versetzt. Die **Kolbenräder** stehen zwischen den eigentlichen Wasserrädern und den Wassersäulenmaschinen. Wie Abb. 854 darstellt, läuft über ein Rad A B C eine Kette A C D mit einer Anzahl runder massiver Kolben E F G. Die Kette geht mit denselben an einer Seite durch eine vertikale runde Röhre, in welche die Kolben ziemlich dicht schließend hineinpassen. Das oben bei E zufließende Wasser drückt also auf die Kolben und bringt so die Kette und das Rad in Bewegung. J ist ein durch die Kurbel H einstellbarer Regulierschütze.



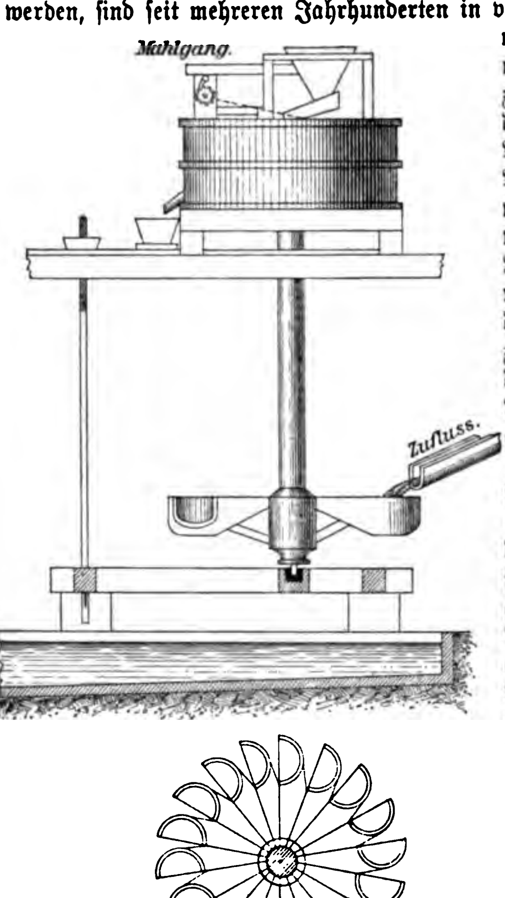
853. Eimerkettenrad. 854. Kolbenrad.

Die Turbinen.

Geschichtliche und technische Entwickelung. Altes horizontales Wasserrad. Segners Wasserrad. Fourneyronsche Turbine. Erste Hochdruckturbine. Henschels und Jonvals Axialturbine. Tangentialturbine. Nagel; Francis; Schwammkrug; Girard. Die verschiedenen Turbinensysteme. Radial-Vollturbinen, System Nagel und Kaemp. Francis-Turbine. Partialturbine. Schwammkrug-Turbine. Tangentialrad. Peltonrad. Anwendung des Peltonrades. Henschel-Jonval-Turbinen. Reguliereinrichtungen. Doppelkranzturbine. Girard-Voll- und Partialturbinen. Kombinationsturbinen.

Geschichtliche und technische Entwickelung der Turbinen.

Horizontale Wasserräder, die nur durch den Stoß eines Wasserstrahles getrieben werden, sind seit mehreren Jahrhunderten in vielen Gegenden zum Betriebe von Mahlmühlen verwendet worden, wo Wasserkräfte mit großen Gefällen zur Verfügung stehen, z. B. in den Pyrenäen, Nordafrika, Skandinavien. In einem über 300 Jahre alten Werke finden sich schon solche horizontale Wasserräder beschrieben. Sie haben gewöhnlich löffelförmige Schaufeln, gegen welche das Wasser von der Seite durch eine Rinne mit großer Geschwindigkeit geleitet wird; der Läuferstein des Mahlwerkes sitzt direkt auf der vertikalen Radwelle. Abb. 855 zeigt ein solches horizontales Wasserrad; dasselbe hat etwa 2 m Durchmesser; in Abb. 856 ist das Löffelrad im Grundriß gezeichnet.



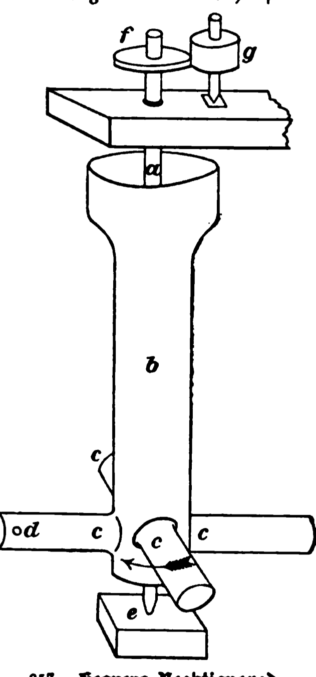
855 u. 856. Altes horizontales Wasserrad.

Nachdem der schon früher erwähnte französische Gelehrte Daniel Bernoulli 1730 in seinem Werke über Hydrodynamik die Reaktionswirkung eines aus einem Gefäße ausströmenden Wasserstrahles nachgewiesen hatte, benutzte Segner dieses Prinzip zur Konstruktion seines schon früher einmal erwähnten Reaktionsrades: Abb. 857 zeigt eine Darstellung aus Segners 1750 erschienenem Werke über hydraulische Maschinen; a ist die Vertikalwelle der ganzen Maschine, die auf dem Zapfen e ruht; b ist ein mit der Welle fest verbundenes Gefäß zur Aufnahme des Betriebswassers, welches unten kreuzförmig vier Ansatzröhren c trägt. Letztere haben an ihren Enden alle nach derselben Seite ein Loch d; aus diesen Löchern strömt also das Betriebswasser aus, und durch die hierbei in allen vier Armen in demselben Drehsinne wirkende Reaktionskraft wird der ganze Apparat mit der Welle a in Rotation gesetzt; die Drehung wird durch die Scheiben f und g weiter übertragen. Die Priorität für dieses erste Vorbild der Reaktionsturbinen gebührt Segner, welcher das beschriebene Rad nicht nur theoretisch behandelt und zum Experimentieren, sondern auch im großen für Kraftgewinnung praktisch ausgeführt hat. Eingehender als Segner bearbeitete der Mathematiker Euler die Theorie der Reaktionsräder; er ordnete die Maschine wesentlich anders an, als die Segnersche Konstruktion,

indem er sie in zwei Teile trennte, einen unbeweglichen Ring, aus welchem das Wasser in einzelnen Strahlen unter bestimmtem, durch die Theorie zu bestimmendem Winkel gegen das darunter befindliche eigentliche Rad leitete; der feste Zuleitungsring entspricht dem Leitkurvenapparat der späteren Turbinen. Ausführungen für praktische Benutzung sind indessen nach den Eulerschen Vorschlägen nicht bekannt geworden.

Später, in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts, konstruierten die französischen Ingenieure Burdin, Poncelet und Fourneyron Turbinen, von denen indessen nur die Konstruktion des Zivilingenieurs Fourneyron zu Besançon vollen Erfolg hatte, da nur sie ein praktisch brauchbares gutes horizontales Wasserrad schuf. Dasselbe hat zwei konzentrisch ineinander liegende Räder; das innere unbewegliche ist das Leitrad, das äußere das Turbinenrad.

Die Abb. 858 stellt eine der ersten praktisch ausgeführten Fourneyronschen Turbinen dar; Abb. 859 ist ein Horizontalschnitt durch beide Räder; A ist das mit gekrümmten Schaufeln a versehene Turbinenrad, K der feststehende Leitkurvenapparat. Das Aufschlagwasser tritt von oben durch das Leitrad zwischen dessen Kurven horizontal am ganzen inneren Umfang ohne Stoß zwischen die Schaufeln des Turbinenrades, gibt seine lebendige Kraft an dieselben ab und fließt gleichmäßig am äußeren Umfange aus. Das Turbinenrad ist durch den Teller B und die Nabe C fest mit der vertikalen Welle D verbunden, welche in dem Spurlager E läuft; die Welle ist von einem unbeweglichen Rohre G umgeben, welches oben bei H fest aufgehangen ist und unten die Hülse J mit dem Teller K trägt; auf diesem sitzen die gekrümmten Leitschaufeln k. Zur Regulierung der wirksamen, aus dem Leitkurvenapparat in das Turbinenrad fließenden Wassermenge dient ein ringförmiger Schütze S, der das Leitkurvenrad k umschließt und durch drei Stangen p in der Höhe so verstellt werden kann, daß der Ausfluß am ganzen Umfang gleichmäßig nach Belieben mehr oder weniger geöffnet oder auch ganz geschlossen werden kann. An der Innenfläche des Ringschützen sind zwischen den Leitschaufeln sowie auch über der Hülse J abgerundete Holzkörper m n angebracht, wodurch bewirkt wird, daß das Wasser in möglichst günstiger Weise, in parallelen Fäden, ohne Wirbelung aus den Leitkurven in das Turbinenrad strömt. Der Schütze trägt am oberen Rande über m eine Lederstulpliderung, welche sich dicht an das cylindrische Gehäuse anlegt und so ein Durchfließen von Wasser außen um den Schützen verhindert. Die drei Stangen p tragen an ihren oberen Enden Gewindespindeln q, deren Muttern in den Naben von drei Zahnrädern r sitzen; diese stehen alle im Eingriff mit einem mittleren Zahnrade S, welches lose auf das obere Ende der festen Röhre G aufgesteckt ist und sich um diese drehen kann. Durch ein kleineres Rad t mit Achse a, welche oben ein Handrad trägt, werden das mittlere Rad und hierdurch gleichzeitig die anderen drei Räder gleichmäßig gedreht, wodurch die Spindelstangen p den Ringschützen heben oder senken. Auf die Turbinenwelle ist ein konisches Zahnrad aufgekeilt, welches die Drehung und die Kraft auf eine horizontale Hauptwelle überträgt.

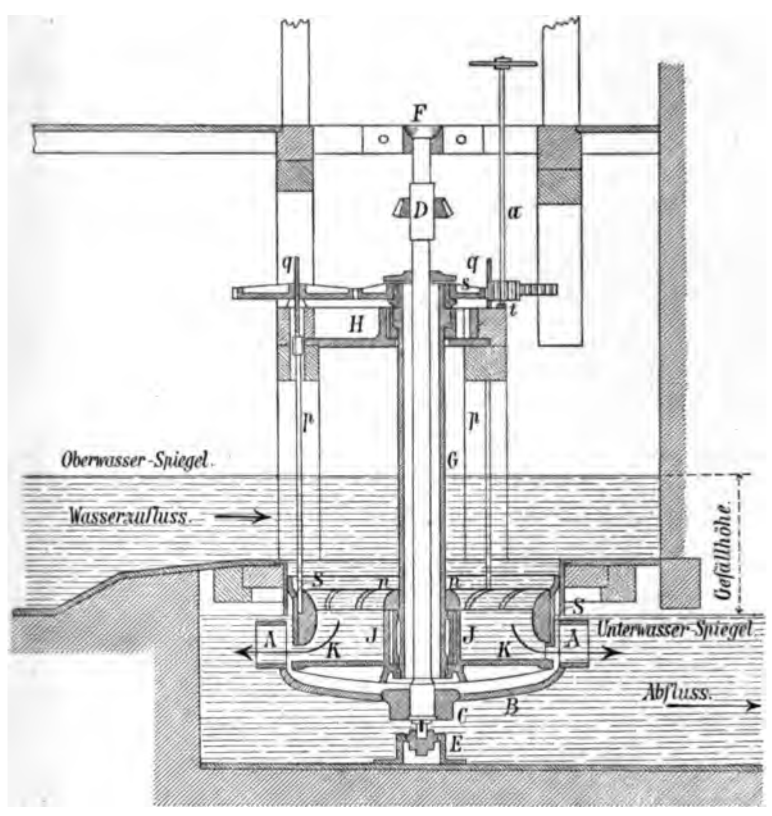


857. Segners Reaktionsrad.

Die Wirkungsweise der Fourneyronschen Turbine erklärt sich nach vorstehender Beschreibung leicht; das Aufschlagwasser wird in eine sogenannte Radstube geleitet, in deren Mitte sich ein cylindrischer Schacht befindet, in dem die Turbine sitzt; es fließt durch die Leitkurven gegen die Turbinenschaufeln, wird durch diese gezwungen, sich an ihrer Fläche entlang krummlinig zu bewegen, wobei es gegen die Schaufeln Drucke ausübt, die das Rad und damit den Teller B und die Welle D in der Richtung der Pfeile in Drehung setzen.

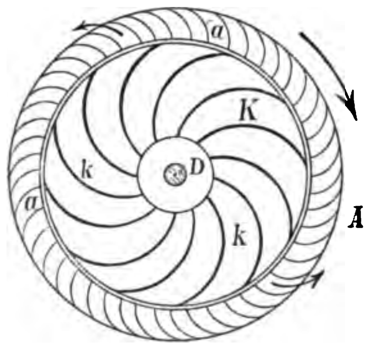
Fourneyron erhielt 1833 für seine Erfindung einen schon seit mehreren Jahren ausgesetzten Preis, um den sich vorher schon Poncelet vergeblich bemüht hatte; bei Einreichung seiner Konkurrenzarbeit konnte Fourneyron schon auf drei ausgeführte wohlgelungene Turbinen hinweisen, welche bis zu 80 % Wirkungsgrad gehabt haben sollen. Seine Konstruktion hatte die größte Bedeutung für die Entwickelung des Turbinenbaues;

eine der ersten mit Erfolg ausgeführten Fourneyronschen Turbinen, welche wegen des damals unerhört hohen Gefälles sehr großes Aufsehen in den weitesten Fachkreisen machte, war diejenige zu St. Blasien im Schwarzwald; zahlreiche Fachleute pilgerten nach diesem abgelegenen Waldort, um dieses neue Wunderwerk zu besichtigen. Das Aufschlagwasser wurde von einer Höhe von 108 m herab in einer starken Röhrenleitung einem kleinen vertikalen Wasserrade von nur 0,55 m Durchmesser zugeführt; dasselbe machte 2300 Umdrehungen pro Minute und leistete 30—40 Pferdestärken Arbeit; eine derartige Leistung mit einem kleinen Wasserrade, sowie überhaupt die Ausnutzung so hoher Gefälle war bis dahin unmöglich gewesen. Durch diese Turbine von St. Blasien ist die Gattung der **Hochdruckturbinen** eingeführt worden; bei hohen Gefällen kann man das Aufschlagwasser nicht in offenen Gerinnen dem Leitrade zuführen; statt dessen werden geschlossene eiserne Rohrleitungen benutzt, welche an den ebenfalls als geschlossenen Cylinder ausgeführten Turbinenschacht angeschlossen werden, so daß die ganze Turbine in eingeschlossenem Druckwasser liegt.



858. Fourneyronsche Turbine.

Obwohl Fourneyron in der Folgezeit viele Nieder- und Hochdruckturbinen mit gutem Erfolge ausführte, fehlte es mehrere Jahre noch ganz an einer ausreichenden mathematischen Theorie derselben. Eine solche wurde von Poncelet entwickelt und zwar in so vortrefflicher Weise, daß alle späteren Turbinentheorien nach dieser gebildet wurden. Von den späteren theoretischen Arbeiten auf diesem Gebiete sind besonders diejenigen der Deutschen Redtenbacher, Weißbach, Wiebe und Hänel wichtig.



859. Horizontalschnitt durch Leitrad und Turbinenrad der Fourneyronschen Turbine.

Ein neues Turbinensystem wurde in Deutschland im Jahre 1837 von den Mechanikern **Henschel & Sohn** in Kassel erfunden, die **Axialturbinen**; bei denselben durchfließt das Wasser die Turbine in der Richtung der Turbinenachse, während die Fourneyronschen Turbinen Radialturbinen waren, bei denen sich das Wasser durch die Leitkurven und das Turbinenrad in radialer Richtung von innen nach außen bewegt.

Die Henschelsche Turbine läuft nicht, wie die Fourneyronsche, im Unterwasser; das Turbinenrad liegt unter dem Leitkurvenapparat, und darunter ist noch luftdicht ein weites Rohr angeschlossen, welches in das Unterwasser eintaucht. Das Wasser strömt von oben durch die Leitkurven in das Turbinenrad und fließt aus diesem nach unten ab. Die unter dem Rade in dem luftdichten Rohre hängende Wassersäule wirkt saugend, so daß die volle Differenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel zur Wirkung kommt. Die Henschelsche Turbine hatte zwei Schützenvorrichtungen, einen Rollschützen, durch welchen ein Teil der Leitkurven abgedeckt werden konnte, so daß das Aufschlagwasser nur in einem Teile des Rades wirksam wurde, und noch eine Drosselklappe in dem Abfallrohr unter dem Turbinenrade.

Kurze Zeit später wurde dem Werkmeister Jonval der Maschinenfabrik von Andrée Köchlin zu Mülhausen i. Elsaß ein französisches Patent auf eine Turbine erteilt, die er „Turbine von doppelter Wirkung" nannte, weil, wie bei der Henschelschen Konstruktion, das Wasser von oben drückend und unten saugend wirkte. Im ganzen war die Turbine von der Henschelschen sehr wenig verschieden; es wurden aber später verschiedene Verbesserungen angebracht, welche zur guten Wirkung und schnellen Einführung dieser Turbinengattung beitrugen; man bezeichnet dieselbe jetzt allgemein mit dem Namen Henschel-Jonval-Turbinen.

In Deutschland machte einige Zeit die Anwendung der Turbinen nur geringe Fortschritte; es wurde denselben nur von wenigen bedeutenderen Ingenieuren und Maschinenfabriken Aufmerksamkeit geschenkt. Zu diesen zählt in erster Linie der Zivilingenieur und Mühlenbauer L. E. Nagel in Hamburg, welcher schon in den dreißiger Jahren, also um dieselbe Zeit, als Fourneyron, Henschel und Jonval mit ihren Arbeiten auftraten, seine ersten Turbinen baute. Er änderte die Fourneyronsche Konstruktion in der Weise ab, daß das Wasser statt von oben, von unten zugeführt wurde; hierdurch wurden Vorteile für die Aufstellung erzielt, besonders für hohe Gefälle. Die Nagelschen Turbinen werden von dem Eisenwerk vorm. Nagel & Kaemp in Hamburg ausgeführt und noch weiterhin besprochen.

Eine neue Turbinenart konstruierten in den vierziger Jahren Escher & Wyß in Zürich, indem sie eine schon ältere Idee Poncelets ausbildeten. Das Wasser tritt bei denselben von außen tangential zum Umfange in die Turbine, woher diese Art den Namen Tangentialturbine erhalten hat; die Firma erwarb sich ein großes Verdienst um die Entwickelung des Turbinenbaues, und ihre zahlreichen vortrefflichen Ausführungen, von denen wir weiterhin noch einige näher zu besprechen haben, erwarben ihr einen wohlbegründeten Ruf weit über die Grenzen ihres Vaterlandes hinaus.

Die Konstruktion guter Turbinen blieb bis in die vierziger Jahre das sorgsam gehütete Geheimnis weniger Ingenieure und Maschinenfabriken; auch Poncelet war es nicht gelungen, aus seiner theoretisch völlig richtigen Theorie praktisch verwendbare Konstruktionsregeln abzuleiten; erst durch die schon erwähnten Arbeiten Redtenbachers wurden derartige Konstruktionsregeln entwickelt, so daß jeder sonst hierzu befähigte Ingenieur Turbinen konstruieren kann, deren Gelingen im voraus gesichert ist.

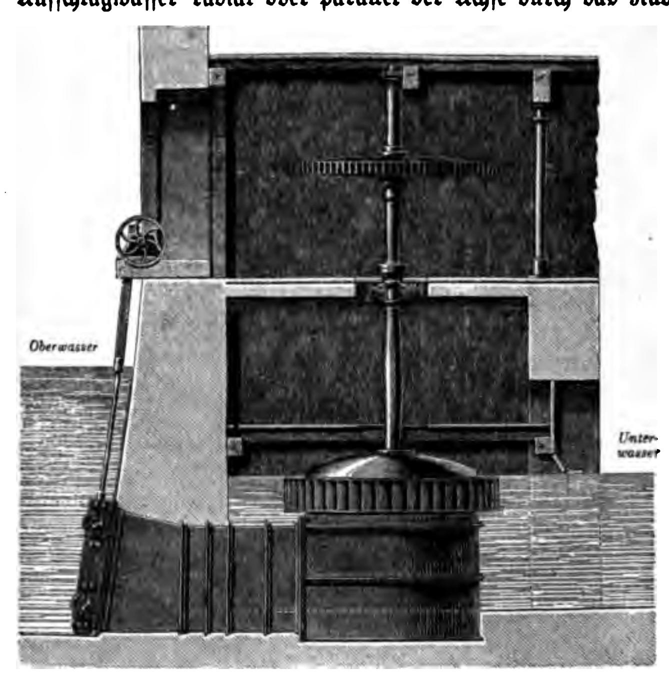
Als hervorragende frühere Turbinenbauer sind noch zu nennen der deutsche Maschinenbaumeister Hänel, der amerikanische Ingenieur Francis, welcher eine neue Turbinenart, nämlich Radial-Vollturbinen mit äußerer Beaufschlagung konstruierte, die unter dem Namen Francis-Turbinen bekannt geworden sind; ferner noch der Deutsche Schwammkrug, der zuerst vertikale Turbinen baute. Der französische Zivilingenieur Girard ließ sich um das Jahr 1850 verschiedene angeblich neue Turbinen patentieren, welche indessen zum Teil den Konstruktionen von Henschel-Jonval und Schwammkrug nachgebildet waren; eine seiner Konstruktionen hat unter dem Namen Girard-Turbine größere Bedeutung erlangt.

In neuerer Zeit ist auch in Deutschland das Mißtrauen, welches früher vielfach gegen die Turbinen herrschte, allgemein geschwunden, seitdem durch zahlreiche vorzügliche Ausführungen erwiesen worden ist, daß dasselbe ungerechtfertigt ist. Der Stand des Turbinenbaues in Deutschland darf gegenwärtig als allen Ländern überlegen bezeichnet werden; viele tüchtige Ingenieure und eine Reihe größerer hervorragender

Maschinenfabriken befassen sich mit der Ausführung von Turbinenanlagen nach den verschiedensten Systemen und haben zahlreiche Verbesserungen besonders an den Reguliermechanismen erfunden und eingeführt; einige spezielle Konstruktionen und ausgeführte Anlagen werden weiterhin bei den einzelnen Turbinenarten besprochen.

Die wichtigsten Turbinensysteme.

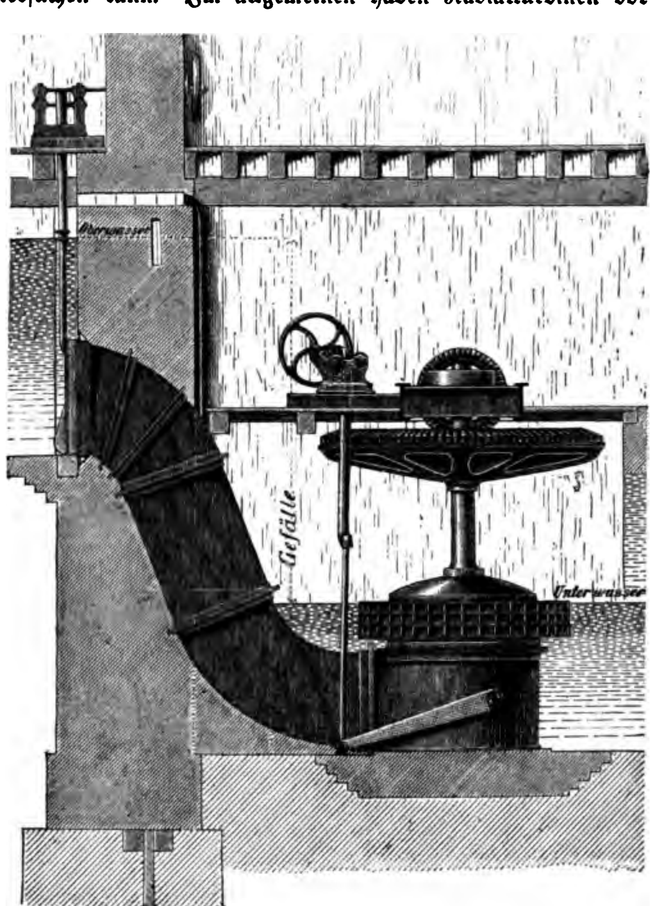
Schon in der vorstehenden allgemeinen geschichtlichen Entwickelung sind die verschiedenen Arten der Turbinen und ihre Unterscheidung teilweise dargelegt worden. Nach dem Wirkungsprinzipe unterscheidet man alle Turbinen in Druck- oder Aktions- und Reaktions- oder Strahlturbinen; die Kombinationsturbinen enthalten, wie der Name schon andeutet, ein Aktions- und ein Reaktionsrad; die Druckturbinen werden vielfach, wenn auch nicht ganz berechtigt, als Girard-Turbinen bezeichnet. Je nachdem das Aufschlagwasser radial oder parallel der Achse durch das Rad fließt, hat man Radial- und Axialturbinen, und bei ersteren sind wieder zu unterscheiden, je nachdem das Wasser von innen nach außen oder umgekehrt in das Rad eintritt, der Leitschaufelapparat also innerhalb oder außerhalb des Turbinenrades liegt, solche mit innerer oder äußerer Beaufschlagung. Alle diese Arten können nach der Art der Beaufschlagung Vollturbinen und Partialturbinen sein; bei ersteren tritt das Wasser am ganzen Radumfang, bei letzteren nur an einem Teile desselben ein; radiale Partialturbinen heißen auch Tangentialturbinen. Eine andere Unterscheidung macht man noch in Turbinen mit und ohne Leitschaufeln; ferner nach der Lage der Turbinenwelle in Turbinen mit vertikaler und mit horizontaler Achse; letztere werden auch nach dem ersten Erbauer dieser Konstruktion Schwammkrug-Turbinen genannt.



860. Radiale Vollturbine, System Nagel & Kaemp, für konstanten Wasserzufluß und Kraftverbrauch.

Welches der verschiedenen Turbinensysteme in einem gegebenen Falle am besten zu wählen ist, welche Aufstellungsart am zweckmäßigsten und welche Konstruktion vorteilhafter ist, kann nicht allgemein, sondern nur nach Berücksichtigung aller einschlägigen Verhältnisse durch einen nicht nach der Schablone arbeitenden, erfahrenen Fachmann bestimmt werden. Es gibt kein Turbinensystem, und es kann keins geben, welches die Vorzüge der verschiedenen Systeme in sich vereinigt und für jede beliebige Wasserkraft und alle besonderen Verhältnisse gleichgut geeignet, also allgemein anwendbar ist. Die ersten Turbinen von Fourneyron, sowohl diejenigen für geringeres Gefälle, wie die Hochdruckturbinen, waren radiale Reaktionsturbinen mit innerer Beaufschlagung, und zwar Vollturbinen; das Aufschlagwasser trat am ganzen Umfang in das Turbinenrad ein und verließ es horizontal zwischen den Radschaufeln, letztere durch seine Reaktionskraft in Drehung versetzend. In den meisten Fällen ist es aber vorteilhafter, den Zulauf des Wassers in das Leitrad von unten her anzuordnen, und diese umgekehrte Aufstellung, die, wie schon

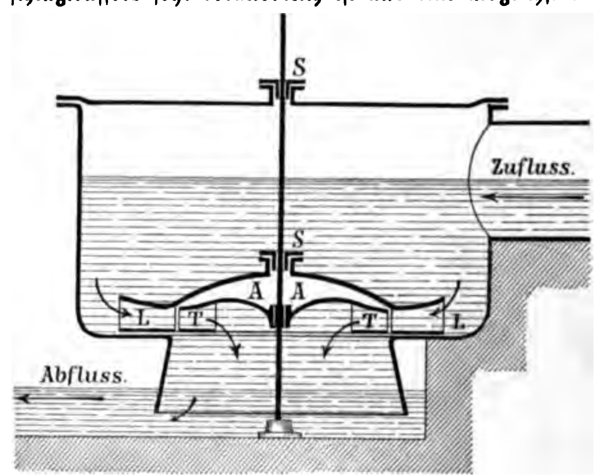
früher erwähnt, zuerst von Nagel in Hamburg angewandt wurde, ist jetzt die gebräuchlichere. Die Nagelschen Konstruktionen werden unter der Bezeichnung „System Nagel & Kaemp“ von der Firma Eisenwerk, vorm. Nagel & Kaemp, A.-G. in Hamburg ausgeführt. Durch das Zuströmen des Wassers von unten wird eine sehr vorteilhafte Entlastung des Turbinenzapfens bewirkt; der Austritt des Wassers wird sichtbar; andere Vorzüge des Systems sind, daß das mit der Achse fest verbundene Laufrad sich leicht abheben läßt, und daß man bei abgehobenem Laufrade das Leitrad und den über Unterwasserspiegel liegenden, bei umgekehrter Anordnung schwer zugänglichen Spurzapfen bequem besichtigen und untersuchen kann. Im allgemeinen haben Radialturbinen vor Axialturbinen das voraus, daß sie eine beinahe vollkommene Regulierung der Wasserdurchflußmenge bei nahezu konstant bleibendem Nutzeffekt ermöglichen, was bei den Axialturbinen nicht in gleichem Maße der Fall ist, wenn auch dieser Nachteil der Axialturbinen in neuerer Zeit durch vervollkommnete Konstruktion der Schaufelung sehr verringert worden ist. Die Axialturbinen haben dafür wieder andere große praktische Vorzüge, durch welche sie sich immer mehr eingeführt haben, so daß sie jetzt mehr angewendet werden, als die Radialturbinen.



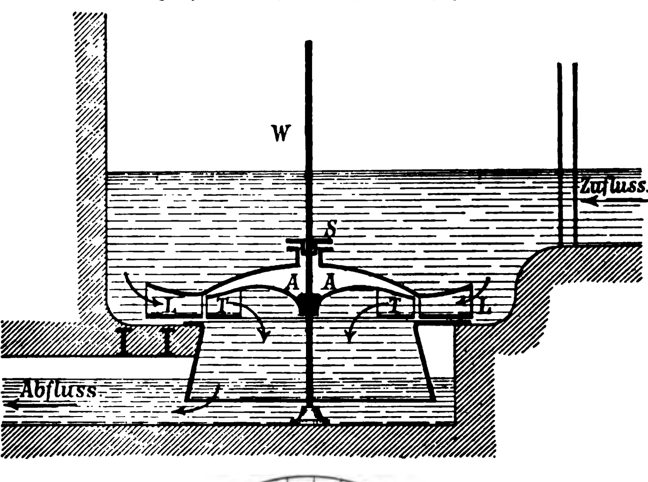
861. Radiale Vollturbine, System Nagel & Kaemp, für sehr veränderliche Wassermengen.

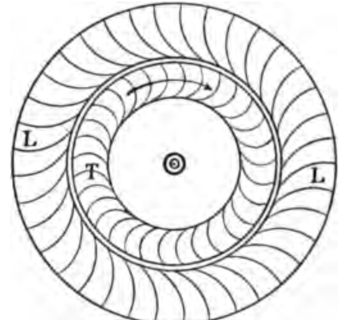
Fast in allen Fällen müssen die Turbinen für veränderlichen Wasserzufluß, also mit Wasserzulaufregulierung ausgeführt werden; nur noch ausnahmsweise können Turbinen für konstante Wassermengen gebaut werden, da hierbei nur die geringste vorkommende Wassermenge in Betracht kommen könnte, die wirklich vorhandene Wasserkraft also während eines großen Teiles des Jahres nicht voll ausgenutzt werden könnte. Abb. 860 zeigt eine Radial-Vollturbine, von Nagel & Kaemp mit Wasserzuführung von unten, mit festem inneren Leitrade und äußerem Turbinenrade; die Wassermenge wird nur durch einen Außenschützen reguliert; diese Anordnung eignet sich nur für konstante Kraft und Wassermenge. Die Kraft der Turbine wird durch ein Stirnrad — wie in der Abbildung — oder durch konische Räder übertragen. Wo Kaftverbrauch und Wassermenge nicht gleichmäßig sind, ist eine weitere Regulierung erforderlich; in solchen Fällen wird das Leitrad mit den Leitschaufeln vertikal verstellbar gemacht. Durch Niederbewegen desselben werden sämtliche Öffnungen der letzteren gleichmäßig verkleinert; es fließt weniger Wasser in das Laufrad, aber stets am ganzen Umfang und genau in derselben Richtung der Wasserfäden und mit demselben Eintrittswinkel,

also in der nach der Theorie richtigen vorteilhaftesten Weise. Wenn die Menge des Aufschlagwassers sehr veränderlich ist und eine möglichst ökonomische Ausnutzung der Wasserkraft auch bei dem Minimalzuflusse geboten ist, genügt indessen die Stellung des Leitrades allein nicht mehr für die Regulierung. In solchen Fällen erhält das Laufrad sogenannte Zwischenböden, die dasselbe in mehrere Etagen teilen. Jede Etage wirkt als Vollturbine theoretisch und praktisch günstig; eine solche Turbine von Nagel & Kaemp stellt Abb. 861 dar; das Heben und Senken des innen gelegenen Laufrades geschieht durch den vorn sichtbaren Hebel mit Zugstange, die oben mittels Zahntrieb und Kurbel bethätigt wird. Die Kraftübertragung ist in der Abbildung durch ein Paar konische Zahnräder angedeutet.



862. Francis-Turbine mit geschlossenem Wasserkasten für hohe Gefälle.



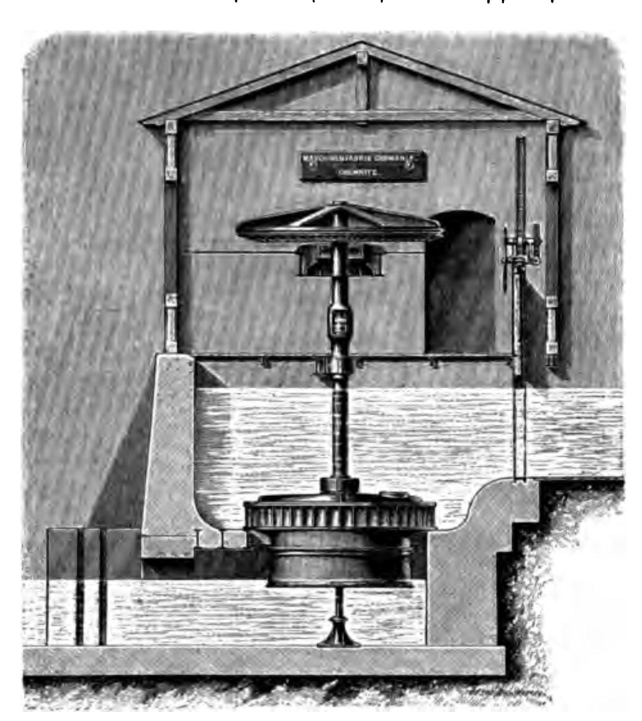


863 u. 864. Francis-Turbine mit offenem Wasserkasten für kleinere Gefälle.
863. Schnitt. 864. Draufsicht.

In den Abb. 862—864 ist schematisch eine radiale Vollturbine mit äußerer Beaufschlagung nach System Francis dargestellt und zwar in Abb. 862 mit geschlossenem Wasserkasten, für höheres Gefälle, in Abb. 863 mit offenem Wasserkasten, für geringeres Gefälle. Das Aufschlagwasser tritt zunächst in ein geschlossenes cylindrisches eisernes Gefäß (Abb. 862) oder einen gemauerten Wasserkasten (Abb. 863), in dem das Leitrad L eingesetzt ist; eiserne Gefäße wendet man an bei höherem Drucke des Aufschlagwassers, wenn letzteres also keinen freien Wasserspiegel hat; die Zuleitung geschieht dann durch eine geschlossene eiserne Leitung, und der eiserne Wasserkasten selbst ist oben durch einen Deckel dicht verschlossen, durch den die Turbinenwelle W mittels einer Stopfbüchse S dicht hindurchgeführt wird (Abb. 862). Zwischen den Kurven des Leitrades strömt das Wasser in das innere Turbinenrad T; dasselbe ist durch den Teller A fest mit der vertikalen Welle W

verbunden; beim Durchgang der Welle durch den Teller wird dieselbe mittels einer Stopfbüchse s abgedichtet, so daß kein Wasser auf anderem Wege als von außen durch die Leitkurven in das Turbinenrad gelangen kann. Francis-Turbinen arbeiten am besten bei konstanten Wassermengen; ihr Wirkungsgrad beträgt dann bei größeren Ausführungen bis 80 %; bei innerhalb nicht zu weiter Grenzen veränderlichen Wassermengen lassen sie sich auch als Regulierturbinen konstruieren; die Leitschaufeln werden zu diesem Zweck durch einen von oben zu bedienenden Mechanismus drehbar gemacht, wodurch die Beaufschlagung für volle bis halbe Wassermenge eingestellt werden kann, der Wirkungsgrad sinkt hierbei allerdings auf etwas über 70 %. Eine in ganz steinernen Wasserkasten eingebaute Francis-Vollturbine größerer Dimension von der Maschinenfabrik Germania, vorm J. S. Schwalbe & Sohn in Chemnitz zeigt Abb. 865; bei 5 cbm Aufschlagwasser pro Sekunde und 3 m Gefälle leistet dieselbe 150 Pferdestärken.

Bei großen Gefällen und verhältnismäßig geringen Wassermengen werden die Vollturbinen für gute Konstruktionsanordnungen zu klein; die Regulierung bei veränderlichem Wasserzufluß wird ungünstig, und die Umdrehungsgeschwindigkeit würde sehr groß werden. Für solche Verhältnisse empfehlen sich Partialturbinen, die für dieselbe Leistung einen größeren Durchmesser haben und deshalb weniger Umdrehungen machen. Allerdings ist ihr Nutzeffekt nicht viel höher als 70 % zu bringen. Man läßt diese Räder nicht im Unterwasser, sondern in der freien Luft laufen; sie arbeiten also mit nur teilweise vom Wasser ausgefüllten Radzellen und gehören bezüglich des Wirkungsprinzips zu den Druckturbinen. Das Aufschlagwasser tritt, wie schon früher erwähnt, nur an einem Teile des Umfanges, an einer oder zwei Stellen in das Turbinenrad, und zwar entweder direkt durch passend geformte Mundstücke des Druckwasserrohres oder durch Leitkurven. Die Partialturbinen können äußere und innere Beaufschlagung und vertikale oder horizontale Achse haben. Abb. 866 zeigt im Schnitt die Konstruktion der radialen Partialturbinen mit vertikaler Achse und stellbarem Leitschaufelring von Nagel & Kaemp; das Wasser wird von unten zugeführt; in einem drehbaren Ring befinden sich in symmetrischer Anordnung einander diametral gegenüberliegende Leitzellen konzentrisch zur Turbinenwelle; außen liegt das Turbinenrad R. Das Leitrad L ist außen mit einem Zahnbogen P versehen, in dessen Umfang das von oben her drehbare Zahnrad Q greift; durch die Drehung werden die Leitkanäle teilweise geschlossen, wodurch die Regulierung der Aufschlagwassermenge bewirkt wird.



865. Francis-Vollturbine.

Abb. 867 zeigt noch ein größeres Tangentialrad für große Gefälle und sehr veränderliche Wassermengen nach Ausführung der Maschinenfabrik Eßlingen, Filiale Cannstatt, vorm. Gebrüder Decker & Co.; das Aufschlagwasser wird in dem gegabelten Zuflußrohr in zwei an gegenüberliegenden Stellen liegende Leitapparate geführt; bei

kleinsten Wassermengen werden diese Räder mit nur einem Einlauf ausgeführt; die Regulierung der Wassermenge geschieht durch Schieber, mittels deren die einzelnen Leitkanäle geschlossen werden können.

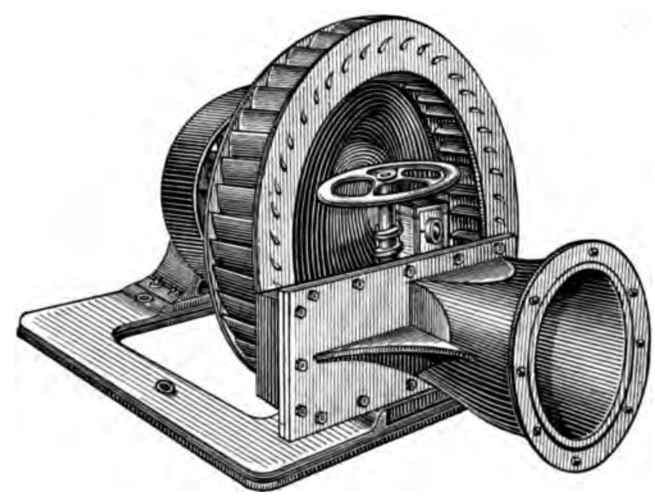
866. Radiale Partialturbine von Nagel & Kaemp (Schnitt).

Für geringere Kräfte, kleine Wassermengen und hohe Gefälle empfehlen sich die Partialturbinen mit horizontaler Achse, nach ihrem Erfinder auch *Schwammkrug-Turbinen* genannt. Dieselben werden für Wassermengen von 50—500 l pro Sekunde und Gefälle von 10—150 m konstruiert; sie arbeiten mit 70—75 % Wirkungsgrad. Abb. 868 stellt eine radiale Partialturbine mit innerer Beaufschlagung und horizontaler Welle von der *Turbinenbauanstalt von H. Queva in Erfurt* dar; durch eine Reguliervorrichtung mit Planschieber läßt sich die Aufschlagwassermenge einstellen. Die direkte Übertragung der Kraft von der Welle aus durch Riemen oder Seile auf die Transmission oder direkt auf rasch laufende Arbeitsmaschinen ohne Anwendung konischer Zahnräder ist sehr einfach und vorteilhaft.

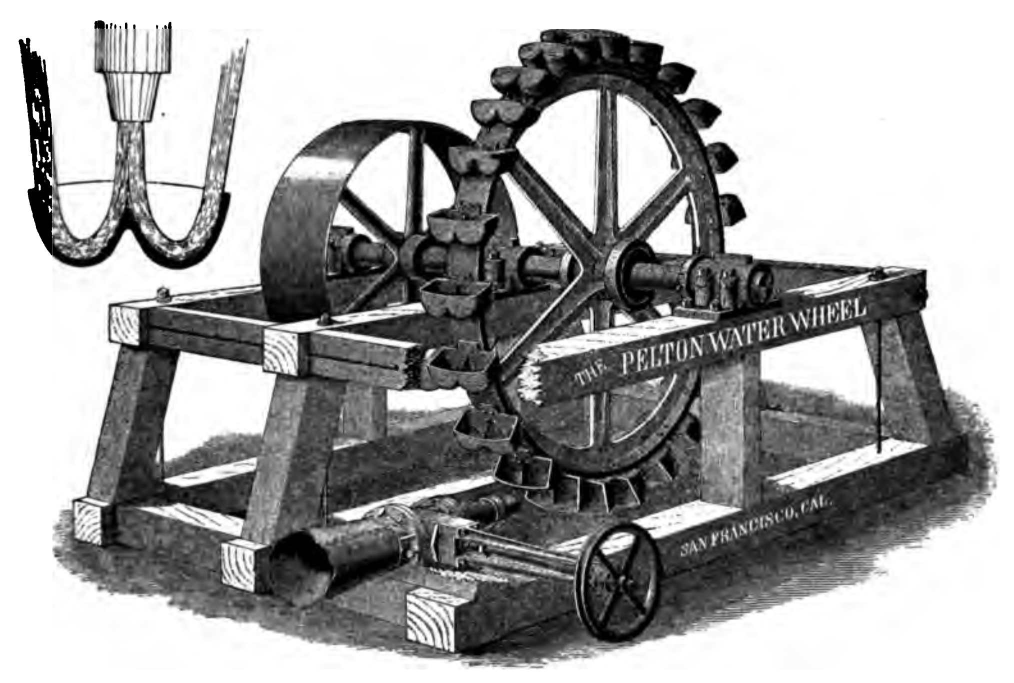
867. Tangentialrad für große Gefälle und sehr veränderliche Wassermengen mit zweiseitigem Einlauf.

Eine neuere Turbinenart, die seit einigen Jahren viele Beachtung gefunden hat, ist das *Peltonrad*. Dasselbe stammt aus Nordamerika, wo es gegen 1884 eingeführt worden ist und seitdem weite Verbreitung und großen Erfolg gefunden hat. Bis Anfang der neunziger Jahre blieb es indessen bei uns wenig bekannt und beachtet, bis Professor Reuleaux zuerst über dasselbe nähere Mitteilungen in deutschen Fachkreisen gegeben hat. Das Peltonrad ist eine Aktionsturbine für hohen Druck mit horizontaler Achse und partialer äußerer Beaufschlagung, ohne Leitkurven; das Rad arbeitet nur durch die lebendige Kraft des aus einem konischen Mundstück gegen die Schaufeln strömenden Wasserstrahles, s. Abb. 869 und 870. Das Rad sitzt auf horizontaler Welle und ist am Umfange mit becherartigen Schaufeln besetzt; das Aufschlagwasser wird durch eiserne Rohrleitungen zugeleitet, bei hohem Druck durch genietete Röhren aus Schmiedeeisen oder Stahlblech, welche zum Schutze gegen Rosten innen und außen gut asphaltiert sind, wie sie in Amerika für Hochdruckwasserleitungen seit längeren Jahren vielfach angewendet werden. Die Regulierung der Aufschlagwassermenge und damit des Ganges des Rades geschieht durch einen Schieber, der vor dem konischen Mundstück in das Druckwasserrohr eingeschaltet

ist, wie in Abb. 870 u. 871, oder eine Regulierspindel (Abb. 872 u. 873). Die Schaufeln werden aus harter Bronze hergestellt und innen sehr sorgfältig geglättet; durch die vorteilhafte Krümmungsform ihrer Mittel- und Seitenwände und die glatten scharfen Vorderkanten derselben, welche bei der Rotation des Rades durch den Wasserstrahl durchschlüpfen, wird eine Stoßwirkung fast vollständig vermieden; das Druckwasser gleitet gleichmäßig an den gekrümmten Wänden vorbei, wobei es seine lebendige Kraft an dieselben abgibt. Der Wirkungsgrad des Peltonrades ist außerordentlich hoch, 80%, 85% und unter günstigen Umständen noch höher. Es eignet sich besonders für hohe Gefälle, von mindestens 10 m ab aufwärts; je größer die Druckhöhe, desto günstiger werden die Verhältnisse für die Anwendung des



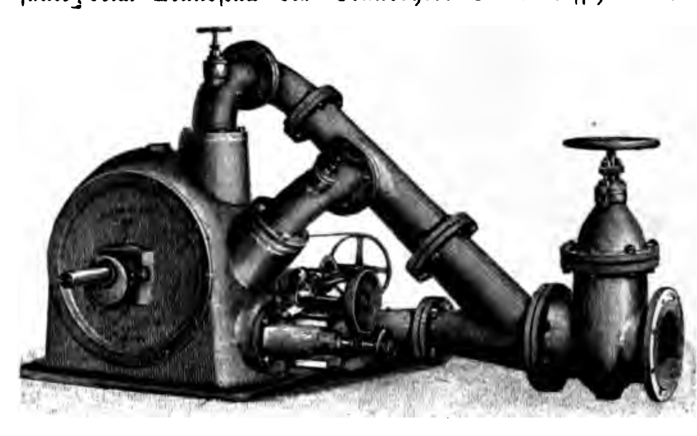
868. Radial-Partialturbine mit horizontaler Achse.



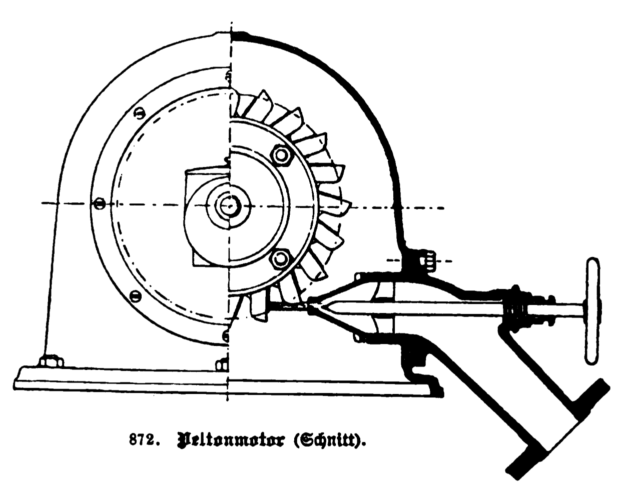
869 u. 870. Peltonrad.

Peltonrades und desto besser wird der Nutzeffekt. Die obere Grenze des Druckes wird nur durch die Rücksicht auf die Festigkeit der Druckwasserleitung und die zulässige Geschwindigkeit, mit der sich das Rad ohne Gefahr drehen kann, bestimmt. Bis jetzt ist die obere Grenze noch nicht erreicht worden; ausgeführt ist in Amerika bereits seit einer Reihe von Jahren eine Anlage von sechs Peltonrädern am Chollar-Schacht in den

Comstockgruben mit 512 m Gefälle, also über 50 Atmosphären Wasserdruck, wobei der Wirkungsgrad 88 % beträgt. Die Räder dieser Anlage haben sich in mehrjährigem Betrieb gut bewährt. Für ein noch höheres Gefälle, nämlich 642 m, hat die Peltonradgesellschaft (Pelton-Water-Wheel-Company zu San-Francisco, Kalifornien) seit 1892 für die Comstockgruben ein Rad aufgestellt; in der Ruhe würde der Druck der Wassersäule beim Mundstück des Druckrohres 64 Atmosphären betragen! Das Rad macht 1150 Umdrehungen pro Minute oder 17 pro Sekunde; es hat 36" oder 914 mm Durchmesser im Radkörper, so daß der Umfang die außerordentliche Umlaufsgeschwindigkeit von 55 m pro Sekunde hat. Da bei einer solchen Umdrehungsgeschwindigkeit sehr hohe Zentrifugalkräfte auftreten, so ist, um ein Auseinanderreißen des Rades zu verhindern, der Radkörper aus einer vollen stählernen Scheibe gebildet, an welche die Schaufeln oder Becher angenietet sind. Das hier ausgenutzte Gefälle ist wohl das größte, welches bisher überhaupt für ein Wasserrad in Benutzung gekommen ist.

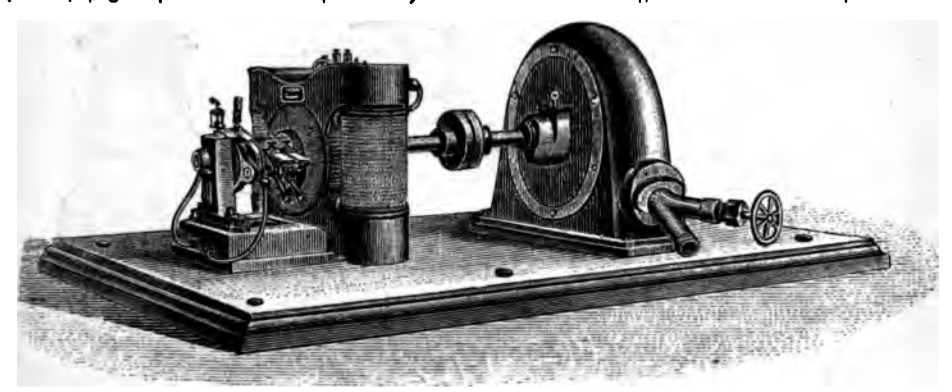

871. Peltonrad mit drei Einströmungen.
Deutsche Wasserwerks-Gesellschaft H. Breuer & Co. in Höchst a. M.

Das Anwendungsgebiet der Peltonräder ist bei weitem größer, als bei allen anderen Turbinensystemen; man kann sie für die kleinsten Wassermengen und Leistungen, z. B. $^1/_{30}$ Pferdestärke zum Betriebe von Nähmaschinen und dergleichen anwenden und bei entsprechender Druckhöhe bis zu 2000 Pferdestärken Leistung eines Rades ausführen. Der Hauptvorteil gegenüber anderen Turbinen liegt in den kleinen Dimensionen des Rades bei hoher Leistung, womit eine hohe Umdrehungsgeschwindigkeit verbunden ist; ein Rad für 2000 P.S. Leistung erhält bei 300 m Gefälle z. B. nur 1,80 m Durchmesser und wiegt nur etwa 1000—1400 kg; das in Abb. 869 dargestellte Rad ist ein sechsfüßiges. Durch Anwendung mehrerer Triebstrahlen auf dasselbe Rad kann man eine zwei-, drei- und mehrfache Arbeitsleistung erzielen. Abb. 871 zeigt ein solches mit eisernem Gehäuse versehenes Rad mit drei Einströmungsdüsen, welche alle zusammen durch einen Hauptabsperrschieber und jede einzelne durch eine Regulierspindel eingestellt werden können. Einen drastischen Vergleich zwischen einem Peltonrade und einem vertikalen rückenschlächtigen Rade bietet die frühere Abb. 847 des großen Wasserrades der Laxey-glen-mines auf der Insel Man mit dem Peltonrad oben rechts in der Ecke. Beide Abbildungen sind etwa im gleichen Maßstabe gezeichnet, und beide Räder leisten an-


872. Peltonmotor (Schnitt).

nähernd dieselbe Arbeit, etwa 150 Pferdestärken; man kann freilich diesen Zwerg mit jenem Riesen nicht als gleichwertig bezüglich der Arbeitsleistung bezeichnen, denn wenn man letzteres Rad durch das Peltonrad ersetzen wollte, so müßte man noch ein schweres Räderwerk zur Verringerung der Geschwindigkeit einschalten. Hier tritt deutlich der für die Technik wichtige Grundsatz in die Erscheinung, der sich in neuerer Zeit mehr und mehr Bahn bricht — bei uns allerdings noch nicht in dem Maße praktisch befolgt wird, wie in Amerika — daß große Geschwindigkeit von hohem wirtschaftlichen Werte ist.

In Nordamerika haben sich die Peltonräder besonders im Gruben- und Hüttenbetrieb in den metall- und zugleich wasserreichen Gegenden in ausgedehntem Maße und mit sehr gutem Erfolge eingeführt. In größerem Maßstabe kamen sie infolge einer siegreichen Wettbewerbung zuerst auf der Idaho-Grube in Nevada zur Anwendung. Im Jahre 1892 waren daselbst 18 derselben von verschiedener Größe in vollem Betrieb für Förderung, Pochwerke, Luftkompressoren, Pumpen u. s. w. Das ausgenutzte Wassergefälle beträgt dort 384′ (117 m), und die Räder arbeiten angeblich mit dem außerordentlich hohen Nutzeffekt von 87 %. Auf der Treadwell-Hütte in Alaska leistet ein siebenfüßiges Peltonrad mit sekundlich nur 300 Liter Wasser bei 150 m Gefälle etwa



878. Peltonmotor direkt mit Dynamomaschine gekuppelt.
Deutsche Wasserwerks-Gesellschaft H. Breuer & Co. in Höchst a. M.

500 Pferdestärken zum Betrieb des größeren Teiles des Werkes, durch bloße Auswechselung des Mundstückes der Druckwasserzuleitung gegen ein größeres kann in wasserreichen Zeiten die Leistung desselben Rades auf 735 Pferdestärken gesteigert werden. Das Rad wiegt nur rund 360 kg, für solche Leistungen gewiß ein unerhört geringes Gewicht. Außerdem befinden sich bei diesem vorzüglichen Wasserkraftbetrieb noch mehrere andere Peltonräder, welche Luftpressen, Pumpen, die Förderung, sowie die Dynamomaschinen zur elektrischen Beleuchtung des ganzen Werkes betreiben. Eine interessante Ausnutzung einer Wasserkraft durch Peltonräder ist eine Drehstrom-Kraftübertragung bei Redlands in Kalifornien; es ist die erste größere elektrische Kraftübertragung in Amerika mittels Dreiphasenstromes oder Drehstromes. Zwei Peltonräder nehmen die Wasserkraft von 68 cbm pro Minute mit 108 m Gefälle auf und geben direkt je 400 Pferdestärken an die Stromerzeugungsmaschinen ab. Der elektrische Strom wird mit 2500 Volt Spannung in zwei Stromkreisen von 12 und $7\frac{1}{2}$ km Länge nach den Städten Redlands und Mentone geleitet. Eine ähnliche Anlage ist zu San Antonio in Kalifornien ausgeführt worden; ein einziger Peltonmotor von nur 80 cm Durchmesser nutzt ein Gefälle von 132 m aus, wobei er etwa 250 Pferdestärken direkt an eine Wechselstromdynamomaschine überträgt; zur Kraftübertragung auf 15 km Entfernung wird eine Stromspannung von 10000 Volt verwendet.

Eine vielfache Anwendung findet das Peltonrad unter dem Namen **Peltonmotor** als Kleinmotor für kleinere Arbeitsleistungen zum Betriebe kleiner Arbeitsmaschinen im

Anschlusse an städtische Wasserleitungen; Abb. 872 zeigt einen solchen kleineren Peltonmotor im Schnitt. Bei dem üblichen Wasserpreise und dem nicht besonders hohen Druck in den meisten Städten erweist sich zwar der Betrieb bei solchen Kleinmotoren ziemlich teuer; wo aber die Maschinen nicht in dauerndem Betriebe sind, sondern nur zeitweilig benutzt werden, kommt dies weniger in Betracht gegenüber manchen Vorzügen, wie Einfachheit der Bedienung, Betriebssicherheit, Reinlichkeit, Geruchlosigkeit u. s. w. Viel günstiger wird seine Anwendung da, wo er an eine Hochdruckwasser-Kraftzentrale angeschlossen werden kann, wie sie später noch besprochen werden. Die einfachste und günstigste Anwendung des Peltonmotors ist zum Betriebe von schnelllaufenden Maschinen z. B. Elektrodynamomaschinen, Ventilatoren, Kreissägen, Zentrifugalpumpen mittels direkter Kuppelung, da hierbei jeder Kraftverlust durch Riemen- und Räderübertragung fortfällt. Eine direkt mit einem Peltonmotor gekuppelte und mit diesem auf einer Grundplatte montierte Dynamomaschine zeigt Abb. 873.

Seit einigen Jahren werden die Peltonräder auch in Deutschland hergestellt, und zwar ist das Ausführungsrecht für Deutschland und die meisten europäischen Staaten der Turbinenbauanstalt von Briegleb, Hansen & Co. zu Gotha übertragen worden, während die kleineren Motoren von H. Breuer

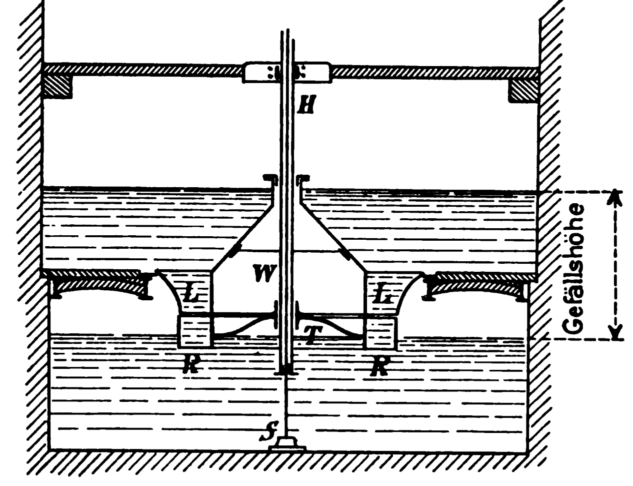
874. Hochdruckdoppelturbine mit horizontaler Welle und Löffelrädern von Escher, Wyß & Co. in Zürich.

& Co., deutsche Wasserwerks-Gesellschaft Nachfolger zu Höchst a. Main fabriziert und vertrieben werden.

Ähnlich wie die Peltonräder sind die **horizontalen Hochdruckturbinen** mit Löffelrädern von **Escher, Wyß & Co.** in Zürich, wie Abb. 874 zeigt. Die Wirkungsweise derselben ist aus der Abbildung ohne weiteres ersichtlich. Sie werden mit einem Löffelrad oder als Doppelturbinen mit zwei Rädern ausgeführt und zwar speziell für Hochdruck und arbeiten mit einem Nutzeffekt von über 80 %; je größer die Druckhöhe ist, desto höher wird die Umdrehungszahl, welche z. B. bei kleineren Motoren für 200 m Gefälle 1000—4000 pro Minute beträgt. Sie werden sowohl für kleinste Leistungen im Anschluß an Druckwasserleitungen wie für große Kräfte und zwar von ½—300 Pferdestärken hergestellt. Für die Gotthardbahn sind zwei solcher Turbinen für ein Gefälle

von 550 m ausgeführt. Die Hochdruckturbinen mit Löffelrad können zum Betriebe schnelllaufender Maschinen direkt gekuppelt werden, während für andere Zwecke in üblicher Weise die Kraft durch Riemenbetrieb übertragen wird.

Die Kraftanlage der elektrischen Zentrale in Davos (Schweiz) wird durch drei horizontale Hochdruckturbinen von Escher, Wyß & Co. betrieben. Die Betriebskraft dieser Anlage liefert der Sertigbach, mit einem nutzbaren Gefälle von 100 m und einer minimalen Wassermenge von 250 Sekundenliter. Da das Werk nur zur elektrischen Beleuchtung dient, also nur abends in Betrieb ist, wird die tagsüber unbenutzte Wassermenge in einem Staureservoir aufgesammelt, damit, besonders bei niedrigem Wasserstande im Frühjahr, das Werk doch während der wenigen Betriebsstunden mit der vollen erforderlichen Leistung von 430 Pferdestärken zu arbeiten vermag. Das Aufschlagwasser wird den Turbinen durch eine 2000 m lange Rohrleitung von 700 mm Durchmesser zugeführt. Besonders sorgfältig ist die Regulierung eingerichtet; dies war gerade wegen der großen Länge der Zuflußleitung notwendig, da bei ungeeigneten Absperrvorrichtungen durch die lange in Bewegung befindliche Wassersäule leicht starke hydraulische Stöße entstehen können. Der sehr empfindliche und kräftige Regulator wirkt auf einen hydraulischen Regulierungsapparat, System Escher, Wyß & Co., und durch diesen auf den Leitapparat der Turbinen; seine Wirkung wird unterstützt durch ein auf der Turbinenwelle stehendes Schwungrad und einen an die Hauptleitung angeschlossenen Windkessel von 12 m Höhe und 1,2 m Durchmesser, der zu $^3/_4$ seiner Höhe mit Luft angefüllt ist. Das erstere gleicht kleine Schwankungen der Tourenzahl aus, der letztere Druckschwankungen in der Zuleitung. Die Differenz in der Umdrehungsgeschwindigkeit zwischen voller Leistung und Leerlauf beträgt 3—4 %. Das Problem einer exakten hydraulischen Regulierung bei hohem Druck und einer sehr langen Rohrleitung ist entgegen dem anfänglichen auch von Fachmännern gehegten Bedenken hier von Escher, Wyß & Co. gelöst worden.



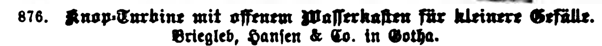
875. Schematischer Schnitt durch eine Henschel-Jonval-Turbine.

Die Henschel-Jonval-Turbinen haben, speziell in der verbesserten Jonvalschen Konstruktion, seit längerer Zeit eine besonders ausgedehnte Anwendung gefunden und die älteren Radialturbinen mehr in den Hintergrund gedrängt. Sie gehören dem Wirkungsprinzip nach zu den Reaktionsturbinen; das Laufrad muß in das Unterwasser tauchen, oder es muß unter demselben ein Saugerohr dicht angeschlossen sein, welches in das Unterwasser hineinreicht. Die frühere Henschel-Jonvalsche, speziell die Jonvalsche Konstruktion, ist in der allgemeinen Anordnung wenig verändert, doch in den einzelnen Teilen und besonders in den Reguliereinrichtungen verbessert worden. Letztere sind, wie schon früher erwähnt, sehr wichtig, da eine Turbine ohne Regulierung bei geringerer Aufschlagwassermenge, als für welche sie konstruiert ist, mit viel ungünstigerem Wirkungsgrad arbeitet.

Eine einfache Regulierung des zulaufenden Wassers durch Einlaufschützen kann nur bei stets überflüssigen Wassermengen angewendet werden, indem nur eine bestimmte Wassermenge zufließt, das übrige Wasser aber unbenutzt vorbeifließt; auf diese Weise wird also die Wasserkraft nur teilweise ausgenutzt. Eine Regulierung durch einen Ablaufschützen oder eine Drosselklappe oder einen Schieber in dem Saugerohr ist nicht zweckmäßig, da hierdurch die Durchflußgeschwindigkeit des Wassers durch das Turbinenrad verringert wird, was ein beträchtliches Zurückgehen des Nutzeffektes zur Folge hat. Drosselklappen oder Schieber bei Turbinen mit Saugerohr werden indessen doch zu einem anderen Zweck angewendet; beim Ingangsetzen derselben muß nämlich zuerst für die Saugewirkung das Saugrohr mit Wasser gefüllt werden, zu welchem Zwecke zunächst die Drosselklappe geschlossen wird. Eine andere Regulierung besteht darin, daß man einen Teil der Leitzellen schließt; dies ist zwar nach der Theorie eigentlich nicht zulässig, denn die Turbine wird hierdurch zu einer Partial-

turbine, indem nur an einem Teile des Radumfanges der Wassereintritt erfolgt, während die Turbinen dieser Gattung theoretisch richtig nur als Vollturbinen konstruiert werden können. Immerhin ist die Methode praktisch eine viel bessere als die vorigen, denn aus den offen bleibenden Leitkurven fließt das Wasser mit der richtigen Geschwindigkeit aus, der Wirkungsgrad nimmt hierdurch nur unbedeutend ab. Schädlich ist es dagegen, die einzelnen Leitkanäle teilweise zu schließen, da hierdurch das Wasser in ganz anderer Weise in das Turbinenrad eintritt; man muß eine gewisse Anzahl nebeneinander liegender Kanäle ganz schließen. Eine vollkommene Regulierung würde darin bestehen, daß man sämtliche Leit- und Laufkanäle gleichmäßig und in richtiger Form verengt; dies ist aber praktisch schwierig zu erreichen oder führt zu komplizierten Konstruktionen. Schließlich ist noch in gewissen Grenzen eine Regulierung durch Anwendung mehrerer Radkränze möglich; hierdurch erhält man die Doppel- oder Mehrkranzturbinen, die weiterhin noch an Beispielen besprochen werden.

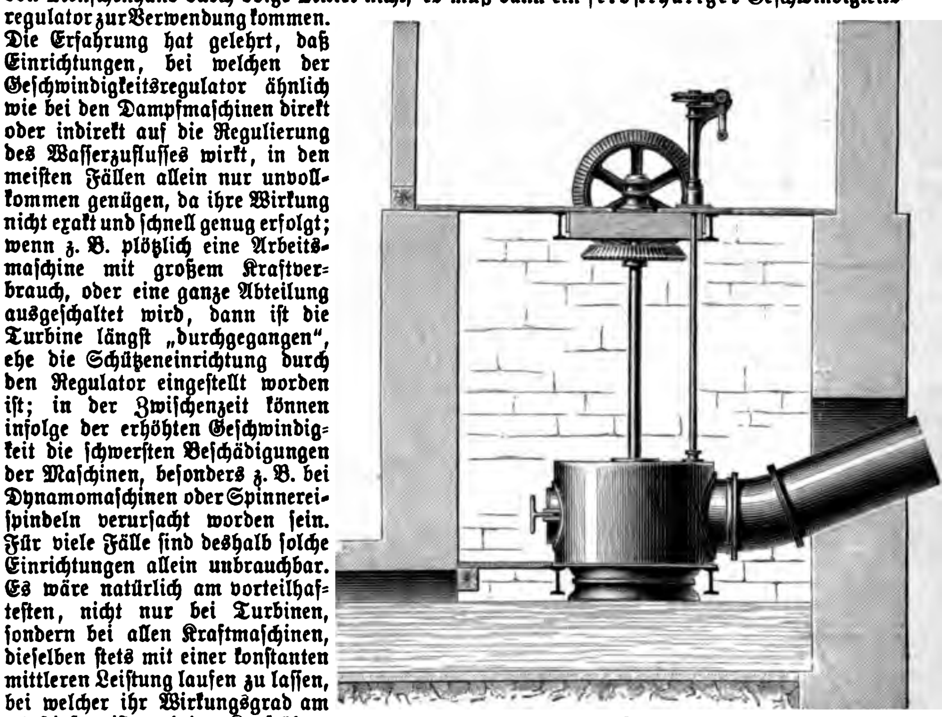
Ebenso wie schon bei anderen Turbinen besprochen (s. Francis-Turbinen) können die Henschel-Jonval- oder Jonval-Turbinen nach den Gefällverhältnissen als Turbinen mit offenem und mit geschlossenem Wasserkasten aufgestellt werden; letztere kommen bei hohen Gefällen in Anwendung. Abb. 875 zeigt schematisch die Anordnung der Henschel-Jonval-Turbinen ohne Saugrohr im Vertikalschnitt; es ist eine Turbine mit offenem Wasserkasten für geringes Gefälle gezeichnet, doch gilt das Allgemeine über die Wirkungsweise ebenso für geschlossene Turbinen und höheres Gefälle. L ist das feste Leitrad, R das dicht darunter liegende, in das Unterwasser eintauchende Turbinenrad, welches durch Arme oder einen Teller T mit der Welle W fest verbunden ist. Letztere läuft unten in dem Spurlager S und wird oben in der Hülse H geführt. Bei der skizzierten Turbine ist keine Reguliervorrichtung angedeutet; sie würde also nur für konstante Wassermenge und wenig veränderlichen Kraftbedarf anwendbar sein. Die Abb. 876 u. 877 zeigen einige Anordnungen axialer Turbinen der im Turbinenbau renommierten Maschinenfabrik von Briegleb, Hansen & Co. in Gotha, welche unter dem Namen „Knop-Turbinen“ (nach ihrem Konstrukteur, dem hervorragenden Turbineningenieur Knop benannt) hauptsächlich verbesserte Henschel-Jonval-Turbinen bauen. In Abb. 876 ist eine Turbine mit offenem Wasserkasten für kleinere oder mittlere Gefälle dargestellt; von der Welle werden durch Stirnräder direkt zwei Mahlgänge angetrieben. Die Anwendung eines geschlossenen Wasserkastens für hohe Gefälle zeigt Abb. 877; die Zuleitung des Aufschlagwassers geschieht durch eine eiserne Rohrleitung.



876. Knop-Turbine mit offenem Wasserkasten für kleinere Gefälle. Briegleb, Hansen & Co. in Gotha.

Zur **Regulierung** dieser Art Turbinen wenden die Erbauer, wenn die Verschiedenheiten im Wasserzufluß und im Kraftbedarf gering sind, die gewöhnliche Abdeckung einer Anzahl von Leitzellen mit Platten an; bei Schwankungen von über 50 % kommt ein Knopscher Regulierschieber zur Anwendung, durch welchen eine Hälfte des Leitrades ganz abgeschlossen wird, in Verbindung mit Abdeckplatten für einzelne Zellen der anderen Hälfte. Wenn bedeutende stündliche Schwankungen der Aufschlagwassermenge oder des Kraftbedarfes zu berücksichtigen sind, welche durch diese Mittel nicht in bequemer Weise während des Betriebes reguliert werden können, dann wird eine sinnreiche einfache Reguliervorrichtung, der **Henkelsche** Fächerschieber angewendet, durch welchen während des Betriebes von außen und durch Übertragung auch von jeder Stelle des Werkes aus das Leitrad in beliebiger Weise, bis zum ganzen Umfange, geschlossen werden kann.

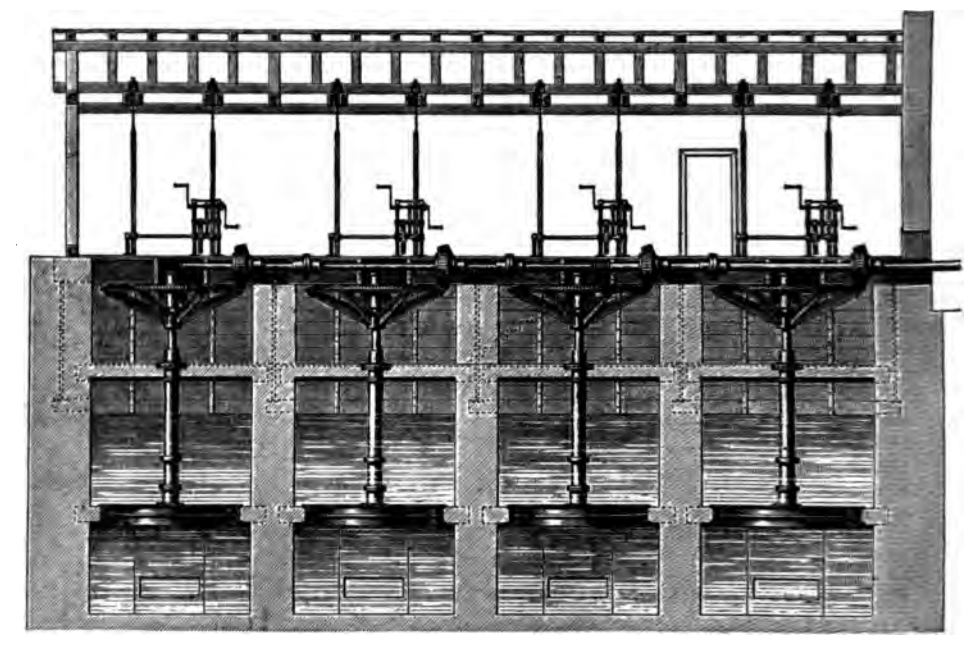
In manchen Fällen, wenn ein sehr gleichförmiger Gang des Triebwerkes auch bei allmählich oder plötzlich eintretenden Schwankungen des Kraftbedarfes verlangt wird, z. B. beim Betriebe von elektrischen Lichtmaschinen, Spinnereien, Webereien u. s. w., genügt die Regulierung von Menschenhand durch obige Mittel nicht, es muß dann ein **selbstthätiger Geschwindigkeitsregulator** zur Verwendung kommen. Die Erfahrung hat gelehrt, daß Einrichtungen, bei welchen der Geschwindigkeitsregulator ähnlich wie bei den Dampfmaschinen direkt oder indirekt auf die Regulierung des Wasserzuflusses wirkt, in den meisten Fällen allein nur unvollkommen genügen, da ihre Wirkung nicht exakt und schnell genug erfolgt; wenn z. B. plötzlich eine Arbeitsmaschine mit großem Kraftverbrauch, oder eine ganze Abteilung ausgeschaltet wird, dann ist die Turbine längst „durchgegangen", ehe die Schützeneinrichtung durch den Regulator eingestellt worden ist; in der Zwischenzeit können infolge der erhöhten Geschwindigkeit die schwersten Beschädigungen der Maschinen, besonders z. B. bei Dynamomaschinen oder Spinnereispindeln verursacht worden sein. Für viele Fälle sind deshalb solche Einrichtungen allein unbrauchbar. Es wäre natürlich am vorteilhaftesten, nicht nur bei Turbinen, sondern bei allen Kraftmaschinen, dieselben stets mit einer konstanten mittleren Leistung laufen zu lassen, bei welcher ihr Wirkungsgrad am günstigsten ist, und den Kraftüberschuß in Sammlern irgend welcher Art (z. B. elektrischen oder hydraulischen Akkumulatoren oder Druckluftbehältern) aufzuspeichern, um später bei zu geringer motorischer Leistung aus diesem Vorrat die Arbeitsleistung der Kraftmaschine zu ergänzen. Wegen der Kosten der Anlage und der Umständlichkeit solcher Einrichtungen ist dies aber nur in besonderen Fällen möglich. Das einzige Mittel, um die Verschiedenheiten zwischen Krafterzeugung und Arbeitsbedarf und zwar bei Überschuß an ersterer sofort auszugleichen, ist, einen Teil der erzeugten Arbeit zu vernichten, in der Weise, daß die Geschwindigkeit der Arbeitsmaschinen ein gewisses Maß nicht übersteigen kann. Verschiedene Einrichtungen beruhen auf diesem Prinzip.



877.
Knop-Turbine mit geschlossenem Wasserkasten für hohe Gefälle.

Der **hydraulische Bremsregulator** von Briegleb, Hansen & Co. z. B. besteht aus einer von der Turbinentransmission angetriebenen Kapselpumpe in Verbindung mit einem Zentrifugalkugelregulator, der ebenfalls von der Transmission in Drehung gesetzt wird und durch ein Hebelgestänge ein Regulierventil der Pumpe steuert. Das Wasser wird in beständigem Kreislaufe aus einem kleinen Behälter durch das Sauge- und Druckventil der Pumpe in denselben zurückgepumpt. Nimmt der Betrieb die volle Arbeitsleistung der Turbine in Anspruch, so daß die richtige Umdrehungszahl der Transmission stattfindet, so läßt der Regulator das von ihm beeinflußte Regulierventil ganz offen; das Wasser kreist also fast ohne Widerstand, und die Pumpe absorbiert dann nur eine sehr geringe, nicht in Betracht kommende Arbeitsleistung. Wenn aber die volle Leistung von den Arbeitsmaschinen bei der

normalen Geschwindigkeit nicht gebraucht wird, so daß die Umdrehungsgeschwindigkeit sich erhöht, so wird alsbald durch den größeren Ausschlag des Regulators der Durchgang des Regulierventils verkleinert und zwar in dem Maße, daß der hierdurch erzeugte Widerstand, der von der Pumpe überwunden werden muß, gleich dem Überschuß der Motorenleistung über die vom Betrieb augenblicklich geforderte Leistung ist. Hierdurch wird bei wechselnden Betriebsverhältnissen eine Geschwindigkeitsveränderung verhindert, so daß mit solchem Apparate versehene Wasserkraftbetriebe bezüglich Gleichmäßigkeit des Ganges den Dampfmaschinen nicht merklich nachstehen. Für große Leistungen, d. h. zur Ausgleichung erheblicher Differenzen im Kraftbedarf werden diese Bremsregulatoren zu groß; um sie aber auch für beliebig große Leistungen vorteilhaft verwenden zu können, wird zwischen Regulierventil und Pumpe ein hydraulisches Druckwerk angeschlossen, welches Reguliervorrichtungen des Aufschlagwassers in Bewegung setzt, sobald der Bremsregulator einen gewissen Leistungsüberschuß bereits aufgenommen hat. Auf diese Weise nimmt der Bremsregulator selbst nur kleinere Schwankungen im Leistungsbedarf des getriebenen Werkes auf, während durch andere Regulierorgane, wie Schützen, Drosselklappen u. s. w., beim Überschreiten derselben selbstthätig der Wasserzulauf reguliert wird.



878. Längenschnitt durch die Turbinenanlage des städtischen Elektrizitätswerkes zu Kassel.

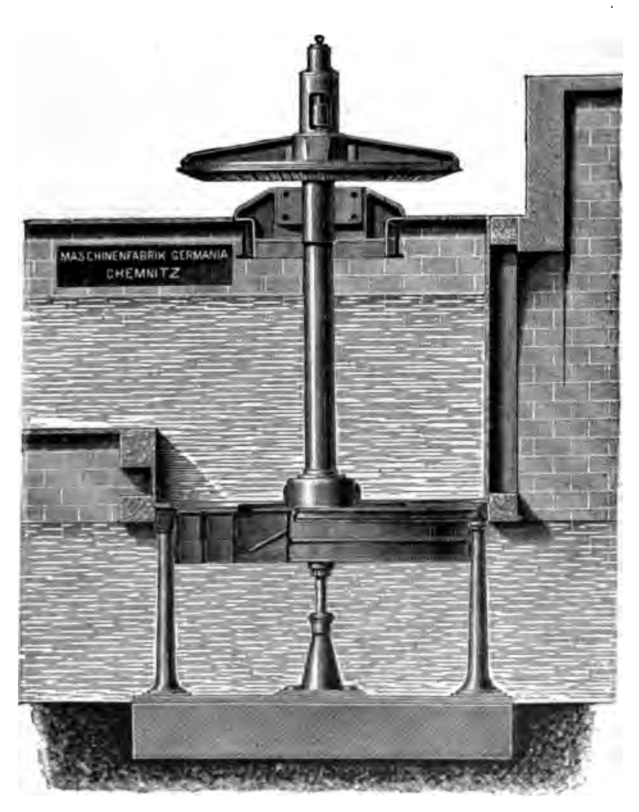
In der Kraftstation des städtischen Elektrizitätswerkes zu Kassel dienen vier Knopturbinen zur Erzeugung eines Teiles der Kraftleistung zum Betriebe der Dynamomaschinen; s. Abb. 878 u. 879. In einer Entfernung von 6—7 km von der Stadt wird die Wasserkraft der Fulda mit 1,35 m Gefälle ausgenutzt; die Turbinen von je 50 Pferdestärken Leistung treiben durch konische Zahnräder gemeinschaftlich eine Welle an, welche wieder die Haupttransmission treibt; da die Dynamomaschinen eine erheblich höhere Tourenzahl verlangen, so ist zwischen diese und die Haupttransmissionswelle noch ein Vorgelege eingeschaltet; vorher ist der oben beschriebene hydraulische Bremsregulator angebracht. Als Reserve für die Zeit ungünstigen Wasserstandes sind zwei stationäre Lokomobilen von je 100 Pferdestärken vorgesehen, die auf die Transmission arbeiten. Von dem Vorgelege werden zwei Wechselstromdynamomaschinen von je 100 Pferdestärken mit 600 Minutenumdrehungen angetrieben; der erzeugte Strom wird mit 2200 Volt Spannung nach zwei Unterstationen in Kassel geleitet; in jeder wird ein Wechselstrommotor von 75—80 Pferdestärken betrieben, und jeder derselben treibt wieder zwei Gleichstromdynamomaschinen, die den zur Beleuchtung dienenden niedrig gespannten Strom liefern. Es wird also kein Beleuchtungsstrom in der Kraftzentrale erzeugt, sondern es wird die von den Turbinen gewonnene Kraft in elektrische Energie übergeführt, auf 7 km

Entfernung übertragen, um dann erst durch nochmalige Umformung in mechanische Arbeit und wieder in Elektrizität für den eigentlichen Verwendungszweck nutzbar gemacht zu werden.

Doppelkranzturbinen für sehr veränderliche Wassermengen haben zwei vollständig getrennte Radkränze mit je einem Leit- und einem Laufrade. Bei genügender Wassermenge arbeiten beide Kränze zusammen; der innere Kranz ist mit Reguliervorrichtung versehen, wodurch die Leitkanäle einzeln bis zum vollen Umfange geschlossen werden können, so daß nur noch das äußere Turbinenrad Aufschlagwasser erhält und allein arbeitet, während bei mittlerer Wassermenge der äußere Kranz mit voller Leistung, der innere teilweise arbeitet. Die Regulierung des einen Leitschaufelkranzes kann in verschiedener Weise, wie bei den einkränzigen Turbinen geschehen. Abb. 880 zeigt eine Henschel-Doppelkranzturbine der Maschinenfabrik Germania vormals J. S. Schwalbe zu Chemnitz in offenem Wasserkasten, frei auf Säulen auf einem gemauerten Fundament stehend; der innere Kranz ist mit Handdeckeln abzudecken; sie leistet bei einer mittleren Wassermenge, wenn der äußere Kranz voll, der innere etwa halb arbeitet, bei 2,6 m Gefälle 186 Pferdestärken.

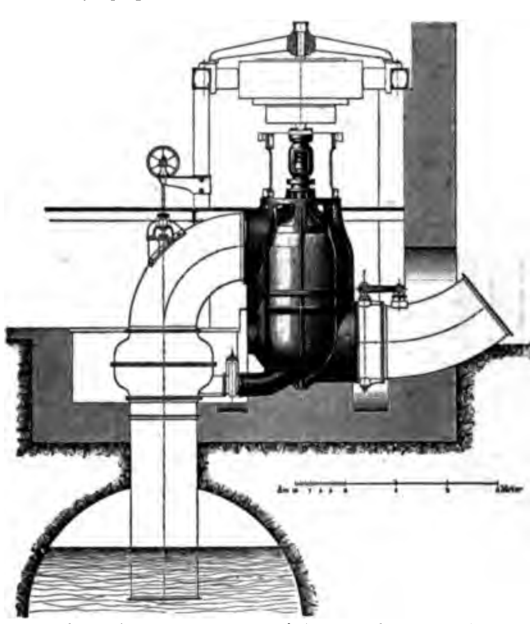
Eine sehr bedeutende Turbinenanlage mit Jonval-Turbinen befindet sich in dem Aluminiumwerk zu Neuhausen beim Rheinfall unterhalb Schaffhausen; die Abb. 881 und 882 stellen die neueren dieser Turbinen im Schnitt und in der Ansicht dar. Die-

879. Querschnitt durch die Turbinenanlage des städtischen Elektrizitätswerkes zu Kassel.



880. Henschel-Doppelkranzturbine.

selben sind erbaut von der schon öfter erwähnten Maschinenfabrik Escher, Wyß & Co. zu Zürich und Ravensberg (Württemberg) und dienen zum Betriebe der großen Elektrodynamomaschinen, mittels deren im großen Maßstabe die Gewinnung des in neuer Zeit so wichtig gewordenen Aluminiums aus Thonerde geschieht. Das ganze Werk ist noch ziemlich neu; im Jahre 1889 erwarb die „Aluminium-Industrie-Aktien-Gesellschaft" von dem schweizerischen Kanton Schaffhausen die Berechtigung, dem Rheine oberhalb des Wasserfalles 20 Sekundenkubikmeter Wasser zur motorischen Ausnutzung zu entnehmen; es kann ein Gefälle von rund 20 m ausgenutzt werden; bei 75 % Wirkungsgrad der Turbinen können also hiermit rund 4000 Pferdestärken nutzbare Arbeit gewonnen werden. Die Wasserkraft wird durch acht Turbinen voll ausgenutzt; von denselben leisten zwei ältere je 600 und eine 300 Pferdestärken, während die in den Abb. 881 u. 882 dargestellten neuen Turbinen je 610 Pferdestärken abgeben. Die Turbinen sind, wie aus den Abbildungen ersichtlich, mit umgekehrter Aufstellung angeordnet: das Leitrad liegt unter dem Laufrad und das Aufschlagwasser wird von unten zugeführt; hierdurch wird wie bei den früher besprochenen Nagelschen Turbinen erreicht, daß durch den Wasserdruck das bedeutende Gewicht des Turbinenrades, der Welle und der direkt auf letztere gesetzten Armatur der Dynamomaschine teilweise aufgehoben wird, also eine Entlastung des unteren Spurzapfens bewirkt, während bei der gewöhnlichen Aufstellung zu diesem Gewichte noch der nach unten wirkende Wasserdruck hinzukommen würde. Das Aufschlagwasser wird aus dem Rheine durch einen gemauerten Kanal zwei schmiedeeisernen Rohrleitungen von 2,50 m Durchmesser zugeführt; an letztere sind die Zweigleitungen für die einzelnen Turbinen angeschlossen. Der Wasserabfluß geschieht durch ein geschlossenes Rohr nach einem gemeinsamen Abflußkanal, in den die einzelnen Abflußrohre, unter Wasserspiegel, einmünden. Auf diese Weise wird ein Saugegefälle vom Turbinenrade bis zum Unterwasserspiegel von 4,8 m nutzbar gemacht, während das Druckgefälle 15,50 m beträgt. Die Regulierungseinrichtungen konnten in diesem Falle sehr einfach gehalten werden, da stets die volle Wassermenge von 20 Sekundenkubikmeter, für welche die Turbinen konstruiert worden sind, zur Verfügung steht und auch der Arbeitsbedarf keinen plötzlichen oder häufigen Schwankungen unterworfen



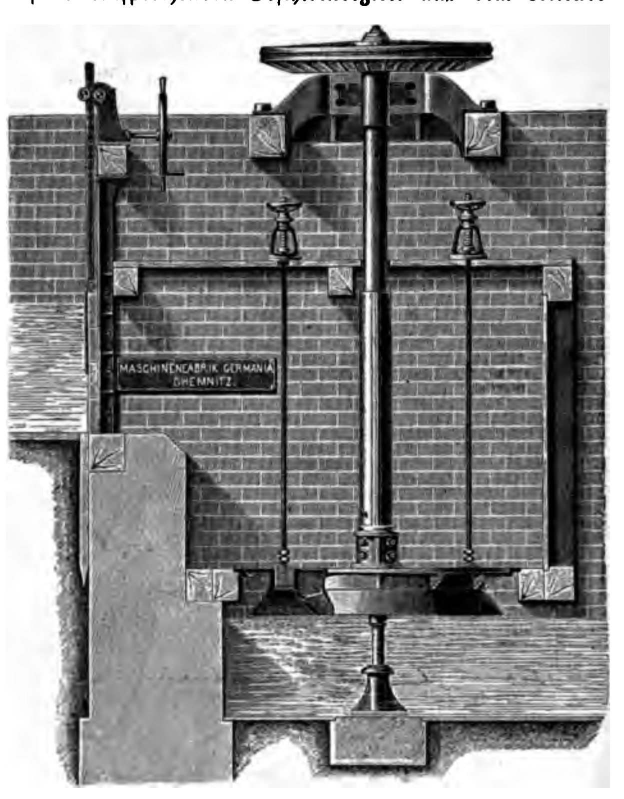
881. Jonval-Turbine des Aluminiumwerkes zu Neuhausen (Schnitt).



882. Ansicht der Turbinen des Aluminiumwerkes zu Neuhausen.

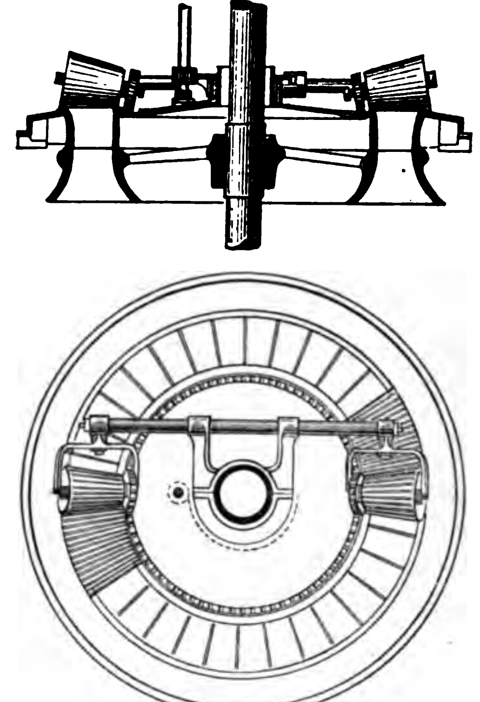
ist. Es ist deshalb nur in dem Saugerohr ein mit der Hand stellbarer Ringschütze eingesetzt, durch welchen ein langsames und gleichmäßiges Drosseln des Wasserabflusses bewirkt wird. Zum völligen Abstellen der einzelnen Turbinen ist in jeder Aufschlagwasser-Zweigleitung eine Absperrvorrichtung eingeschaltet. Zwischen dem unteren Turbinengehäuse und dem Abflußrohre ist eine Verbindung mit Schieber hergestellt, durch welche Turbine und Zweigrohr entleert werden können. Die Turbinenräder haben 1,62 m Durchmesser und machen 150 Umdrehungen pro Minute.

Seit etwa Mitte der siebziger Jahre haben sich die Axialturbinen des schon früher genannten französischen Zivilingenieurs Girard viel Erfolg verschafft. Die Girard-Turbinen sind Druck- oder Aktionsturbinen; das Aufschlagwasser tritt mit einer dem ganzen wirksamen Gefälle entsprechenden Geschwindigkeit aus dem Leitrade aus, schießt an der inneren Seite der Schaufeln des Laufrades entlang ohne die andere konvexe Seite derselben zu berühren, ohne also die Kanäle des Turbinenrades an einer Stelle auszufüllen; hierbei gibt das Wasser seine lebendige Kraft an das Laufrad ab, wobei seine Geschwindigkeit möglichst herabgemindert wird. Da die Kanäle nie vom Wasser ausgefüllt werden, so dürfen die Aktionsturbinen nicht in das Unterwasser eintauchen, sondern müssen um ein geringes Maß über dem Spiegel derselben angeordnet sein; aus diesem Grunde heißen sie auch hängende Turbinen. Girard selbst hat übrigens anfangs seine Turbinen auch als Reaktionsturbinen, also mit in das Unterwasser tauchendem Laufrade konstruiert. In dem freien Wasseraustritt besteht ein Vorzug des Systems, indem man durch die bequeme Beobachtung desselben, wobei ersichtlich ist, mit welcher größeren oder geringeren absoluten Geschwindigkeit das Wasser die Turbine verläßt, ohne weiteres einigermaßen beurteilen kann, wie vollkommen das Wasser die in ihm enthaltene lebendige Kraft abgegeben hat, woraus sich die mehr oder weniger gute Wirksamkeit dieser Turbinen erkennen läßt. Durch geeignete Formgebung der Leitkurven und Radschaufeln ist eine sehr vollkommene Regulierung möglich, so daß die Turbinen mit nahezu gleichbleibendem Wirkungsgrade arbeiten, gleichviel ob sämtliche Zellen oder nur einige beaufschlagt werden, sie also als Voll- oder als Partialturbinen arbeiten. Die Girard-Turbinen können deshalb da vorteilhaft angewendet werden, wo es sich um die Ausnutzung sehr veränderlicher Wassermengen bei ziemlich konstantem Gefälle handelt, also kein Steigen des Unterwasserspiegels stattfindet. Sie werden sowohl als Radial- wie Axialturbinen ausgeführt, meistens als letztere, und gewöhnlich versteht man unter einer Girard-Turbine eine axiale Druckturbine. Wenn bei kleinen Wassermengen und großem Gefälle der Durchmesser der Turbine bei voller Beaufschlagung zu klein und die



883. Axiale Girard-Vollturbine mit offenem Wasserkasten.

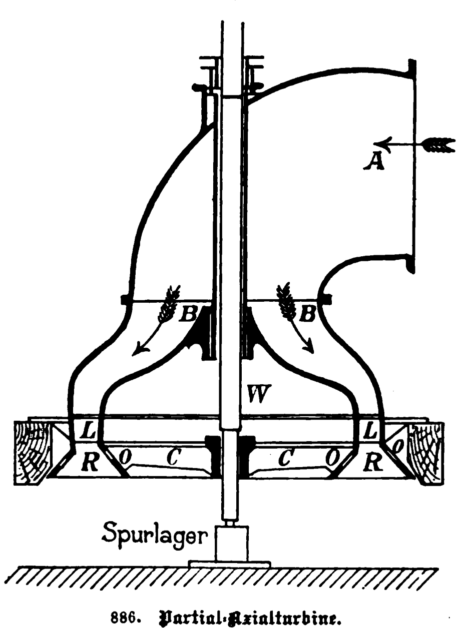
Umdrehungszahl zu groß würde, konstruiert man sie als Partialturbinen. Die Reguliermechanismen sind ähnlich, wie die früher besprocheren; sie bestehen in Abdeckplatten, Ringschützen, vertikalen oder horizontalen Schiebern. In Abb. 883 ist eine axiale Girard-Vollturbine mit offenem Wasserschacht dargestellt; Leitrad und Laufrad sind links im Schnitt sichtbar; sie ist mit Schieberregulierung für teilweise und volle Beaufschlagung versehen. In der Abbildung ist die Anordnung ersichtlich: die Schieber werden durch Stangen mit Gewinde am oberen Ende mittels Handrädern auf und ab bewegt. Die dargestellte Turbine ist für 1000—5000 l Wasser pro Sekunde und 1—4,5 m Gefälle, also für sehr verschiedene Wasserverhältnisse konstruiert und leistet bei 3 m Gefälle mit 4 cbm Wasser 120 Pferdestärken.



884 u. 885. Rollschützen einer Axialturbine.

In den Abb. 884 und 885 ist die Anordnung eines Rollschützen bei einer Axialturbine in der Konstruktion von H. Queva in Erfurt sichtbar; durch ein Paar Zahnräder, von denen das eine mittels Stange und Handrad von oben bedient wird, kann der Schütze eine halbe Kreisbewegung machen, wobei er an zwei gegenüberliegenden Seiten die Leitkanäle abdeckt.

Eine geschlossene Girard-Partialturbine mit Beaufschlagung an zwei Stellen für größeres Gefälle ist in Abb. 886 schematisch im Schnitt dargestellt; das Aufschlagwasser-Zuflußrohr A gabelt sich in zwei Arme B, welche sich in der radialen Richtung stark verengen, und aus denen an zwei gegenüberliegenden Stellen das Wasser in die Leitschaufeln L tritt, die in zwei Bogenteilen des Umfanges über dem Laufrade R liegen. Letzteres ist mittels der Arme C fest mit der Welle W verbunden. Bei allen Druckturbinen mit freiem Ausfluß ist für einen regelmäßigen ungehinderten Durchfluß des Wassers eine „Ventilation" der Zellen des Laufrades notwendig, d. h. es muß die Luft austreten können; hierzu dienen die in der Skizze angedeuteten Öffnungen O O.

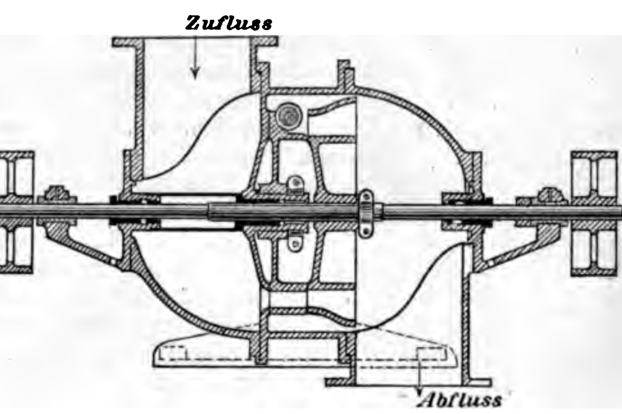


886. Partial-Axialturbine.

Axiale Druckturbinen werden für kleinere Kraftleistungen auch mit horizontaler Welle konstruiert; ein solche von H. Queva & Co. in Erfurt ist in Abb. 887 im Schnitt dargestellt; das Aufschlagwasser tritt von oben in das geschlossene Turbinengehäuse, geht horizontal durch Leitrad und Laufrad und verläßt das Gehäuse aus dem unteren Abflußstutzen. Die horizontale

Welle trägt an beiden Seiten Riemenscheiben zum Riemenantrieb der Arbeitsmaschinen oder der Transmissionswelle.

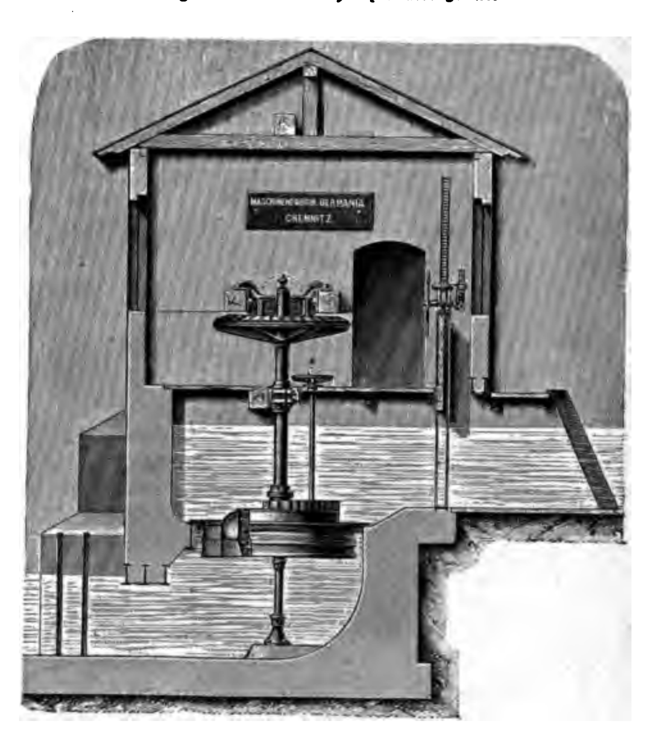
Unter dem Namen **Kombinationsturbinen** werden in neuerer Zeit für veränderliche Wassermengen Axialturbinen mit zwei (zuweilen auch drei) konzentrischen Radkränzen gebaut; dieselben ergeben bei den größten Schwankungen des Wasserzuflusses noch die besten Resultate. Meist wirkt der äußere Kranz als Henschel- oder Jonval-Turbine, der innere als Druckturbine. Abb. 888 zeigt eine solche offene Kombinationsturbine von der schon genannten Maschinenfabrik Germania in Chemnitz; die Wassermenge kann von 0,5—3 cbm pro Sekunde schwanken, das Gefälle von 1—3 m.



887. Axialturbine mit horizontaler Welle.

Die Wassersäulenmaschinen.

Erfindung derselben. Reichenbachs Wassersäulenmaschinen für Soolenleitung von Berchtesgaden nach Rosenheim. Neuere Wassersäulenmaschinen.



888. Kombinationsturbine.

Die Wirkungsweise dieser Gattung Wasserkraftmaschinen ist bereits in der Einleitung dieses Kapitels kurz dargelegt. Ihre Erfindung schließt sich an die Konstruktion der ersten brauchbaren Dampfmaschine von Newcomen im Anfang des 18. Jahrhunderts; durch die Erfolge derselben kam man auf den Gedanken, in ähnlicher Weise durch den Druck des Wassers in einem Cylinder einen Kolben hin- und herzutreiben. Die Franzosen Denisard und Dueille konstruierten eine Kolbenmaschine, welche von Quellwasser mit 9 Fuß Druckhöhe betrieben wurde und $^{3}/_{64}$ der verwendeten Wassermenge um 32 Fuß höher getrieben haben soll, als die Quelle lag. Diesem Versuche folgte aber keine weitere nutzbare Ausführung; die eigentliche Erfindung der Wassersäulenmaschinen erfolgte gegen die Mitte des 18. Jahrhunderts fast gleichzeitig durch Höll in Ungarn, Winterschmidt in Deutschland und Westgarth in England. Die ältesten Maschinen fanden viel Verbreitung zu den ungarischen Silberbergwerken und den Bleibergwerken in Kärnten, später auch im

Bergbau in Sachsen. Eine schon verbesserte alte Kärntner Maschine in Kreuth bei Bleiberg hatte zwei einfachwirkende Arbeitscylinder mit abwechselndem Krafthub; sie arbeitete mit einer Wasserdruckhöhe von 258 österreichischen Fuß (82 m), und jeder Kolben machte pro Minute 8 Hübe. Die Maschine diente zum Betriebe einer Pumpe und förderte mit derselben pro Hub 564 Pfund Wasser auf eine senkrechte Höhe von 432 Fuß (316 l auf 138 m). Der Wirkungsgrad betrug etwa 82%. Wichtige Verbesserungen an den Wassersäulenmaschinen, besonders bezüglich der Steuerung, wurden erst am Anfange des 19. Jahrhunderts durch den bayrischen Salinenrat von **Reichenbach** eingeführt. Hierdurch wurde die großartige und bis auf unsere Zeit bedeutsame Salinenleitung von Berchtesgaden nach Rosenheim am Inn ermöglicht, indem die Salzsoole durch eine 12½ Meilen lange Rohrleitung auf über 1000 m Höhe nach den Verarbeitungsstellen gepumpt wurde. Eine solche Förderhöhe war damals unerhört und ist auch heute noch für eine Pumpenanlage keine kleine Leistung; aber Reichenbach löste das Problem durch die Anwendung vorzüglicher Wassersäulenmaschinen neuer, eigener Konstruktion, zu deren Betrieb er mittels langer Rohrleitungen Wasserläufe des Hochgebirges herbeiführte und deren hohe Gefälle dienstbar machte. Die ganze Soolenleitung von Berchtesgaden bis Rosenheim ist in zwölf Abschnitte geteilt; die Hebung des Wassers ist auf zwölf Pumpanlagen verteilt, welche durch acht Wassersäulenmaschiuen und acht Radkünste betrieben werden. Die größte Förderhöhe hat die Anlage bei Illsank zwischen Berchtesgaden und Reichenhall mit 1229 Fuß; die Reichenbachsche Wassersäulenmaschine arbeitet hier mit pro Sekunde einen Kubikfuß (32 l) Aufschlagwasser mit 372 Fuß (119 m) Gefällshöhe. Diese vorzügliche alte Maschine arbeitet (nach Professor Rühlmann) mit 83% Nutzeffekt.

Reichenbach unterschied seine Wassersäulenmaschinen in einfach- und doppeltwirkende, je nachdem das Aufschlagwasser nur einseitig oder abwechselnd von beiden Seiten auf den Arbeitskolben wirkte; letzterer war bei beiden Konstruktionen direkt mit dem Kolben der Pumpe verbunden, welcher bei einfachwirkenden Maschinen nur beim Niedergange drückte, indem das Aufschlagwasser von oben den Arbeitskolben niedertrieb, während bei den doppeltwirkenden auch die Pumpe beim Auf- und Niedergange drückend wirkte. Die Reichenbachschen Maschinen sind besonders für Bergwerkspumpen im Harz für erhebliche Tiefen (bis 200 m) angewendet worden.

In den vierziger Jahren hat noch der später besonders durch seine Kanonen berühmt gewordene englische Großindustrielle Armstrong die Wassersäulenmaschinen weiter vervollkommnet; er erfand die hydraulischen Akkumulatoren, durch welche sie als Sekundärmotoren, besonders zum Betriebe von Kränen und Hebewerken anwendbar wurden. (Weiteres hierüber in dem Schlußkapitel über zentrale Kraftversorgung.)

In neuerer Zeit werden Wassersäulenmaschinen besonders in Bergwerken zum Betriebe von Wasserhaltungs-, Fördermaschinen und sogenannten Kunstgestängen benutzt und zwar sowohl mit natürlichen Wasserkräften, wie mit künstlichem Wasserdruck mittels Preßwasser; ferner in ausgedehntem Maße als Wassermotoren oder Wasserdruckmaschinen bei zentralen Druckwasseranlagen. Wenn das Betriebswasser erst durch Preßpumpen mit maschinellem Antrieb, z. B. durch Dampfmaschinen, auf hohen Druck gebracht wird, dann fungiert es nur als Übertragungsmittel für die von der Primärmaschine (Dampfmaschine mit Preßpumpe) produzierte Arbeit; beim Betriebe von Wassersäulenmaschinen durch Aufschlagwasser mit natürlichem Druck dagegen enthält dieses selbst das Arbeitsvermögen als das Produkt von Wassermenge und Gefällshöhe. Die Wirkungsweise der Wassersäulenmaschinen selbst ist übrigens bei diesen beiden Betriebsarten wenig verschieden, bei der Kraftübertragung durch Preßwasser wird, um die Dimensionen der Druckrohrleitung und der Maschine zu verkleinern, meist mit sehr hohen Pressungen, von fünfzig bis zu mehreren hundert Atmosphären gearbeitet; solche Drucke kommen bei natürlichen Wasserkräften nicht vor.

Die Anwendung der Wassersäulenmaschinen in Bergwerken bietet manche Vorteile: für Wasserhaltungen verdrängen in neuer Zeit die unterirdischen Maschinen immer mehr die unbeholfenen, schweren, obertägigen Gestängemaschinen; letztere gestatten wegen der schweren auf und ab zu bewegenden Massen nur eine niedrige Hubzahl, im günstigsten Falle

acht bis zehn pro Minute. Dieses bedingt bei großer Wasserlieferung große Pumpen und schwere Gestänge und als Folge hiervon viel Platz im Schacht; auch ist die Dampfausnutzung solcher langsam gehenden Betriebsmaschinen nicht ökonomisch. Die Anwendung unterirdischer Wassersäulenmaschinen hat gegenüber den unterirdischen Dampfmaschinen wieder ihre besonderen Vorzüge; wo natürliches Druckwasser zur Verfügung steht, ist ihre Verwendung natürlich von vornherein vorteilhaft. Bei dem Druckwasserbetrieb fällt die lästige Erhitzung des Schachtes und Maschinenraumes unter Tage durch die Dampfrohre fort, was bei Schächten, die an und für sich schon sehr warm sind, von großer Bedeutung ist; die Motoren sind sehr einfach und bedürfen fast keiner Wartung, auch fallen die unter Umständen sehr verwickelten Rohrleitungen für das Kondenswasser aus den Dampfcylindern, Cylindermänteln u. s. w. fort. Durch diese Vereinfachungen wird der Betrieb unterirdischer Wassersäulenmaschinen zuverlässiger und sicherer, was besonders für Bergwerksmaschinen von weittragender Bedeutung ist. Hierbei ist noch der Umstand zu erwähnen, daß solche Maschinen auch weiter arbeiten und selbst von oben her in Betrieb gesetzt werden können, falls der Maschinenraum durch irgend einen unglücklichen Zufall unter Wasser kommen würde. Schließlich arbeiten Wassersäulenmaschinen mit hohem Nutzeffekt, und der Betrieb ist also ein ökonomischer.

Sie werden in stehender und liegender Anordnung konstruiert; die vertikale Aufstellung ist in solchen Fällen erforderlich, wo im Schacht selbst stehende Pumpen betrieben werden sollen, besonders also z. B. beim Abteufen von Schächten. Abb. 889 zeigt eine derartige vertikale Wassersäulenmaschine mit Schachtpumpe von Haniel & Lueg in Düsseldorf-Grafenberg. Der Pumpenstiefel hängt direkt unter dem Arbeitscylinder; Maschine und Pumpe sind an einem Drahtseilflaschenzug aufgehängt und mit Gelenkröhren an die Druckwasserzuleitung und die Steigrohrleitung angeschlossen.

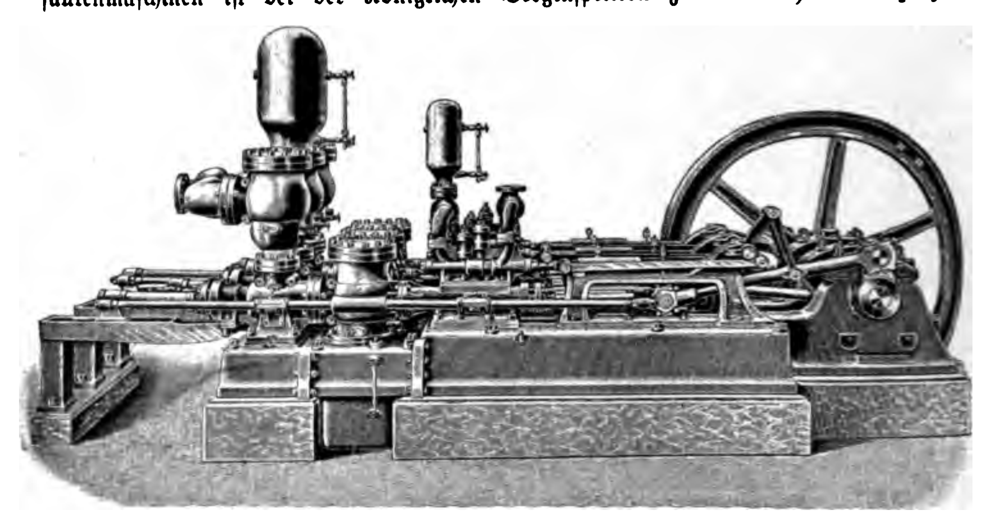


889. Vertikale Wassersäulenmaschine mit Schachtpumpe von Haniel & Lueg in Düsseldorf.

Die liegenden Wassersäulenmaschinen werden mit und ohne Schwungrad konstruiert; erstere, die sogenannten rotierenden Maschinen, verdienen den Vorzug, da die Stoßwirkung der einzelnen Kolbenhübe besser ausgeglichen wird, wodurch mehr Hübe pro Minute zulässig sind und ein gleichmäßiger Gang erzielt wird. Eine größere, dreifach gekuppelte rotierende Wassersäulenmaschine für Wasserhaltung ist in Abb. 890 dargestellt. Der hydraulische Motor, welcher durch drei einfach wirkende Plunger von dem Druckwasser betrieben wird, ist direkt mit der Pumpe auf einem gemeinsamen Rahmen montiert und treibt vermittelst Umführungsstangen die drei dahinterliegenden einfach wirkenden Pumpenplunger. Die drei Kraftcylinder werden einzeln gesteuert, ein an der Seite angebrachtes Schwungrad dient zur Erzielung eines gleichmäßigen und stoßfreien Ganges. Die abgebildete Maschine ist von Haniel & Lueg in Düsseldorf für die Zeche Rheinpreußen bei Ruhrort ausgeführt; sie steht etwa 450 m tief und wird mit Preßwasser betrieben. Die Pressung des Arbeitswassers beträgt über Tag 150 Atmosphären, wozu die Höhe der Wassersäule bis zu

der genannten Tiefe von 450 m mit 45 Atmosphären hinzukommt, so daß unten in der Maschine der ungeheuere Wasserdruck von 195 Atmosphären herrscht. Derselbe würde also bei einer natürlichen Wasserkraft einem Gefälle von 1950 m entsprechen. Die Wassersäulenmaschine arbeitet indessen effektiv nur mit 150 Atmosphären Druck, indem das Preßwasser nach der Arbeitsleistung nicht aus den Kraftcylindern ausläuft, sondern durch eine besondere Rückleitung wieder auf 450 m Höhe bis zu den oberen Preßpumpen zurückgedrückt wird, so daß hinter den Arbeitskolben ein Gegendruck von 45 Atmosphären herrscht. Das Preßwasser wird also stets wieder benutzt und macht einen Kreislauf. Die Maschine macht 60 Touren pro Minute, und jede einzelne Pumpe fördert pro Minute 2,5 cbm Wasser mit einem Mal auf die ganze Höhe von 450 m.

Eine der größten, wahrscheinlich die größte der bisher ausgeführten Wassersäulenmaschinen ist bei der Königlichen Berginspektion zu Clausthal im Harz im



890. Liegende unterirdische rotierende Wassersäulenmaschine für Wasserhaltung in Bergwerken.

Betrieb (ausgeführt von Haniel & Lueg, Düsseldorf); sie dient zum Betriebe eines Fahrkunstgestänges (s. Bd. V) für 1000 m Schachttiefe und ist 360 m unter Tage aufgestellt. Das Kraftwasser wird von Tage her der Maschine zugeleitet und fließt durch einen Stollen ab.

Eine eigentümliche Wasserkraftmaschine sei hier noch erwähnt, welche beim Bau des Mont Cenis-Tunnels zur Erzeugung von Preßluft für den Betrieb von Gesteinsbohrmaschinen benutzt worden ist. Dieselbe gehört im gewöhnlichen Sinne des Wortes und nach der eingangs gegebenen Erklärung nicht zu den eigentlichen Wassersäulenmaschinen, da sie ganz ohne Kolben arbeitete. Es wurden nämlich die großen zur Verfügung stehenden Wasserkräfte mit hohen Gefällen in der Weise zum Betriebe von Luftkompressoren ausgenutzt, daß man direkt die lebendige Kraft des fallenden Wassers ohne Umformung benutzte, indem man in einem U-förmigen, ungleichschenkeligen Rohre in den 25 m langen Schenkel eine Wassersäule herabfallen ließ, wodurch in dem anderen oben geschlossenen 5 m langen Schenkel Luft stoßweise stark zusammengepreßt wurde. Ein Rückschlagventil verhinderte das Zurücktreten der gepreßten Luft, während ein Ventil am tiefsten Punkte des Wasserrohres nach jedem Schlage das Wasser abließ. Die komprimierte Luft wurde zu einem Windkessel und von hier durch Rohrleitungen in den Tunnel vor Ort zu den von ihr betriebenen Bohrmaschinen geleitet. Eine Steuerung bewirkte in regelmäßigen Zwischenräumen das Öffnen und Schließen des Wasserzu- und Abflußventils. Eine solche Maschine ist zwar wegen des Fehlens aller Zwischenmittel, wie Kolben, Kolbenstange, Kurbelwelle, sehr einfach in der Anordnung, aber die Schläge sind zu heftig, so daß die Röhren und Dichtungen dieselben auf die Dauer nicht aushalten. Aus diesem Grunde erhielt die erste nach diesem Prinzip gebaute Maschine keine Nachfolger, man zog vielmehr Wassersäulenmaschinen vor.

Die Ausnutzung der Wasserkräfte.

Allgemeines. Ausnutzung der Wasserkräfte des Rheins. Anlagen zu Schaffhausen. Wasserkraftübertragungswerke Rheinfelden.

In den letzten Jahren ist vielfach, nicht nur in den engeren Kreisen der Fachleute, sondern auch in Laienkreisen über die bessere Ausnutzung der Naturkräfte, speziell der natürlichen Wasserkräfte geredet worden, besonders seitdem man Mittel gefunden und verschiedene Systeme ausgebildet hat, Kraft bezw. Arbeit vom Gewinnungsorte auf weite Entfernungen nach den Verwendungsstellen zu übertragen. Auf Schritt und Tritt begegnete man Projekten über die Ausnutzung von Wasserkräften, besonders größeren Wasserfällen, und selbst ernste Leute und Techniker sprachen von der Ausnutzung der angeblich überall, selbst auch in der norddeutschen Tiefebene vorhandenen unerschöpflichen, bisher unbenutzten Quellen kostenloser Wasserkräfte, von deren Gewinnung und Ausnutzung ein großer wirtschaftlicher Umschwung erwartet wurde. Solche Erwartungen sind indessen übertrieben; nur unter besonderen Umständen ist es möglich, diese „kostenlosen" Wasserkräfte wirtschaftlich günstig auszunutzen, und der wirtschaftliche Erfolg ist doch schließlich für solche Anlagen, wie überhaupt für alle gewerblichen und industriellen Unternehmungen, allein maßgebend. Ebensowenig wie die ungeheueren, noch nicht gehobenen, in der Erde ruhenden Schätze der Steinkohlenlager, können die Wasserkräfte kostenlos gewonnen werden, und die Steinkohlen stellen einen viel größeren Kraftspeicher dar, als alle verwertbaren Wasserkräfte. Vergleichen wir einmal allgemein die Verhältnisse zwischen der Arbeitserzeugung durch Verbrennung von Steinkohlen und durch die Ausnutzung einer Wasserkraft und die in beiden Fällen für eine bestimmte Leistung zu verwendenden Mengen des Betriebsmittels oder Kraftträgers. 1 kg Steinkohlen enthält etwa 7000 Kalorien Verbrennungswärme, also nach Früherem ein mechanisches Äquivalent von 3 000 000 kgm Arbeit. Wie wir in dem folgenden Kapitel sehen werden, werden hiervon in Dampfkessel und Dampfmaschine bei guten größeren Anlagen im Mittel etwa 10 % in nutzbare Arbeit umgewandelt; es können also aus 1 kg Steinkohlen etwa 300 000 kgm Arbeit gewonnen werden; nimmt man selbst nur 270 000 kgms an, so erzeugt man durch Verbrennen von 1 kg Steinkohlen 1 Stunde lang $\frac{270\,000}{60 \, . \, 60} = 75$ skgm oder 1 Pferdestärke Arbeitsleistung. In Turbinen wird die in dem Wasser enthaltene Arbeitskraft etwa mit 75 % ausgenutzt; für die Leistung von 1 Pferdekraft ist also eine Wassermenge pro Sekunde von $\frac{75}{0{,}75} = 100$ kg mit 1 m Gefälle, oder 20 kg mit 5 m Gefälle erforderlich; in der Stunde müssen also 72 000 kg Wasser mit 5 m Gefälle zur Verwendung kommen, um dieselbe Leistung zu erzeugen, wie 1 kg Kohlen. Hieraus können allerdings keine Schlüsse über den technischen Wert beider Materialien gezogen werden, aber es geht doch daraus hervor, daß die Steinkohle ein vielmal reicheres Kraftmittel ist als das Wasser. In diesem großen Wärme- und Arbeitsinhalt der Kohlen ist im allgemeinen ihre wirtschaftliche Überlegenheit über alle anderen Kraftmittel begründet, denn hierdurch ist es möglich, mit verhältnismäßig geringeren Mengen, welche überall zu beschaffen sind, große Arbeitsleistungen zu erzeugen. Ferner kann die Menge des Betriebsmittels jederzeit nach dem Arbeitsbedarfe eingerichtet werden, während bei Wasserkräften meist das umgekehrte Verhältnis stattfindet; denn solche Fälle, wo die Wassermenge unter allen Umständen in genügender Menge zur Verfügung steht, sind seltene Ausnahmen. Meist ist die Wassermenge und das Gefälle in bestimmten, beschränkten Grenzen gegeben, und die auf die Ausnutzung der Wasserkraft basierende zu errichtende Anlage muß betreffs ihrer erforderlichen Arbeitsgröße nach der Größe der Wasserkraft eingerichtet werden. Nicht selten kommt es vor, daß Wasserkräfte, die mit großen Anlagekosten ausgenutzt werden, doch in Zeiten von Wassermangel die erforderliche Arbeitskraft nicht leisten können, und daß noch besondere Dampfmaschinen aufgestellt werden müssen, die einen Teil des Betriebes übernehmen. Letzteres ist nun keineswegs unter allen Umständen wirtschaftlich unvorteilhaft; es ist sogar meist richtiger, von vornherein die Wasserkraftanlage so zu gestalten, daß sie mit voller Sicherheit während des

größten Teiles des Jahres mit voller Leistung arbeiten kann, und die fehlende Leistung oder auch zeitweise besonders großen Kraftbedarf durch Dampfmaschinen zu decken. Anderseits ist indessen die große Bedeutung der Ausnutzung der Wasserkräfte in technischer wie wirtschaftlicher Hinsicht nicht zu verkennen und zu unterschätzen. Schon die kleinen und mittleren Wasserkraftbetriebe — sei es mit Wasserrädern oder Turbinen — für Mahl- und Sägemühlen, sowie Holzschleifereien in abgelegenen Gegenden ohne Großindustrie und ohne gute Eisenbahnverbindung, besonders z. B. in waldreichen Gebirgsgegenden, haben ihre wirtschaftliche Bedeutung, da sie dem Dampfbetriebe wegen der zu hohen Kosten der Kohlen überlegen sind. Aber auch für die Kraftversorgung der Großindustrie und in neuerer Zeit mittels der verschiedenen Methoden der Kraftübertragung und Kraftverteilung auch für die Versorgung mehrerer Fabriken oder ganzer Industriebezirke mit mechanischer Arbeitskraft können in manchen Fällen Wasserkräfte sehr vorteilhaft ausgenutzt werden; nur darf nicht von vornherein jede große Wasserkraft zur vorteilhaften Kraftgewinnung geeignet gehalten werden. Es kann hierbei kein Urteil im allgemeinen ausgesprochen werden; vielmehr sind die besonderen Verhältnisse in jedem einzelnen Falle maßgebend. Die erste Vorbedingung für den Erfolg einer großen Wasserkraftanlage ist natürlich, daß die gewonnene Kraft auch sichere und vorteilhafte Verwendung findet, daß also Kraftbedarf für Industrie vorhanden ist, oder daß mit Zuversicht erwartet werden kann, durch die Schaffung der Wasserkraftanlage und Darbietung von mechanischer Arbeit unter günstigen Bedingungen werde bald eine neue Industrie erwachsen; auf dieser Voraussetzung ist z. B. die noch weiterhin besprochene großartige Wasserkraftanlage zu Rheinfelden geplant und ausgeführt worden. Dann muß die Beschaffenheit der Wasserkraft bezüglich ihrer Lage, ihrer Gefällshöhe und Wassermenge, sowie der Schwankungen der letzteren so sein, daß die Gewinnung der Kraft in technischer Beziehung nicht zu große Schwierigkeiten bietet, die Anlagekosten also nicht unverhältnismäßig groß werden, und daß mit Sicherheit dauernd die Wassermenge genügt, um die Anlage wenigstens annähernd voll zu betreiben. Schließlich ist stets das Verhältnis der Gestehungskosten der aus der Wasserkraft gewonnenen Arbeit zu den Kosten der Dampfkraft, also besonders der Preis der Kohlen entscheidend.

Einige Beispiele von Wasserkraftausnutzungen sind schon früher mitgeteilt worden; es seien hier noch verschiedene größere und besonders interessante Anlagen besprochen.

Schon seit längerer Zeit haben die gewaltigen, fast unerschöpflichen Kräfte, die der Rhein besonders in seinem Oberlaufe, ehe er bei Basel die nördliche Richtung einnimmt, besitzt, die Aufmerksamkeit von Technikern und Industriellen auf sich gelenkt. Es kommen dabei in Betracht die Rheinkräfte von Reichenau bis Basel. Die Gefällsverhältnisse in der oberen Strecke, bis zur Einmündung in den Bodensee, sind sehr günstig und werden auch von kleineren Werken zum Teil ausgenutzt, aber die Wassermenge ist noch ziemlich klein und sehr schwankend. Für große Anlagen kommt eigentlich erst die Strecke von Schaffhausen ab in Betracht.

Schaffhausen hat eine der bedeutendsten Wasserwerksanlagen, welche das Vorbild für manche andere spätere Werke geworden ist; die Kraftanlage wird von den Stromschnellen oberhalb der schon erwähnten, beim eigentlichen „Rheinfall von Schaffhausen" liegenden großen Aluminiumfabrik Neuhausen betrieben. Schaffhausen hatte bis gegen Ende der fünfziger Jahre eine sehr geringe Industrie und gar keine Großindustrie. Bis zum Jahre 1851 dienten nur eine Anzahl unterschlächtige Wasserräder als Motoren, welche an zwei Kanälen aufgestellt waren, und von denen noch heute einige übrig geblieben sind. Diese Räder genügten aber den Ansprüchen nicht mehr, und besonders in dem Winter 1857/58 konnten wegen sehr niedrigen Wasserstandes die sämtlichen davon abhängigen an den beiden Betriebskanälen liegenden kleinen Fabrikanlagen und Gewerbebetriebe nur mit sehr verminderten Kräften arbeiten, einige mußten den Betrieb ganz einstellen. In direkter Nähe aber befand sich die gewaltige Kraftquelle der Stromschnellen des Rheins oberhalb des Wasserfalles: auf eine nicht bedeutende Länge konnte ein beträchtliches Gefälle gewonnen werden; die Wassermenge des Rheins ist hier schon sehr groß, und ein beträchtliches Abnehmen derselben in der trockenen Jahreszeit ist ausge-

schlossen, da das ungeheuere Vorratsbecken des nur wenige Meilen entfernten Bodensees stets genügende Wassermengen abgeben kann, ohne daß sein Spiegel bedeutend gesenkt wird. Hier konnten also, allerdings durch Aufwendung bedeutender Geldopfer, Tausende von Pferdestärken gewonnen werden. Durch die genannte Notlage faßten mehrere weitblickende Schaffhausener Bürger den Plan, diese Kraft nutzbar zu machen und nach Schaffhausen zu leiten; ein sehr gewagtes Unternehmen, denn größere Kraftübertragungen auf solche Entfernung waren damals noch unbekannt.

Einem schlichten Schaffhausener Bürger, dem Uhrmacher Heinrich Moser, gebührt in erster Linie das Verdienst, die Ausführung des großartigen Werkes mit Überwindung vieler Schwierigkeiten durchgesetzt zu haben; er selbst hat die Wasserbauten im Rhein entworfen und geleitet.

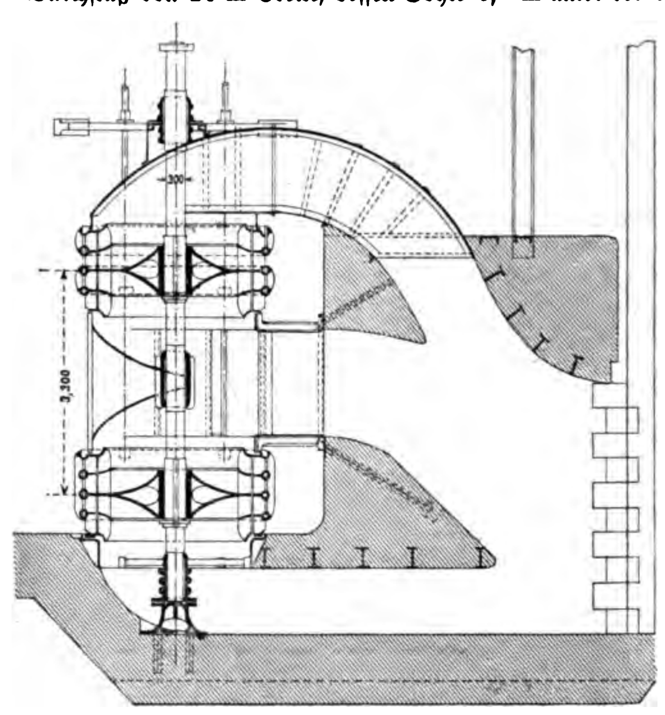
Quer durch den Rhein ist ein Wehr gebaut, welches das Wasser aufstaut; am linken Rheinufer ist in das Strombett hinein ein Turbinenhaus gebaut, in dem drei große Turbinen von je 200—250 Pferdestärken stehen. Um einen möglichst niedrigen Unterwasserspiegel zu erhalten, ist von dem Turbinenhause ein Kanal ausgeführt, der bis zum Unterwasser reicht, so daß das volle Gefälle vom Turbinenhause bis zum Unterwasser noch mit nutzbar gemacht wird. Von der im Turbinenhause gewonnenen Kraft wird ein Teil, etwa 200 Pferdestärken, durch eine Wellenleitung direkt nach einer naheliegenden Fabrik am linken Rheinufer abgegeben; die übrige Arbeit wird durch zwei Drahtseiltriebe über den Rhein nach Schaffhausen geleitet und hier mittels zahlreicher Stationen in der Stadt verteilt. Diese alte Anlage ist jetzt 30 Jahre in Betrieb, und durch dieselbe ist Schaffhausen aus einem stillen Landstädtchen zu einer bedeutenden Industriestadt ausgewachsen. Der direkte finanzielle Erfolg der Anlage erscheint zwar auf den ersten Blick nicht glänzend, indem in den ersten Jahren keine und später nur eine bescheidene Rente erzielt wurde; berücksichtigt man aber den Aufschwung, welchen die Stadt durch die Wasserwerksanlage genommen hat, so muß die Kapitalanlage als eine vorzügliche bezeichnet werden.

Unterhalb des alten Turbinenhauses ist 1891 von der Wasserwerksgesellschaft eine neue, größere Anlage zur Ergänzung der vorhandenen angelegt worden mit fünf Turbinen von je 300 Pferdestärken; zwei derselben sind von Joh. J. Rieter in Winterthur nach System Jonval ausgeführt; wegen des veränderlichen Wasserstandes zu verschiedenen Jahreszeiten sind dieselben als Doppelkranzturbinen mit 3,40 m äußerem und 1,80 m innerem Schaufelkranzdurchmesser konstruiert, von denen bei niederem Wasserstand der äußere Kranz allein, bei hohem beide in Wirksamkeit treten. Die Turbinen arbeiten mit Sauggefälle und machen 46 Umdrehungen pro Minute. Sie betreiben zwei Dynamomaschinen, durch welche mittels 630 voltigen Stromes 565 Pferdestärken nach einer 740 m vom Turbinenhause entfernten Kammgarnspinnerei in Schaffhausen übertragen werden, die früher durch die alte Drahtseiltransmission betrieben wurde. Die drei anderen Turbinen sind ganz ähnlicher Konstruktion, mit derselben Leistung und Umdrehungszahl. Zwei derselben betreiben die Dynamomaschinen einer neuen, direkt an das Turbinenhaus angebauten Aluminiumfabrik der schon erwähnten Aluminiumindustrie-Aktiengesellschaft in Neuhausen.

Eine noch viel großartigere Anlage zur Ausnutzung der Wasserkräfte des Rheines ist weiter unterhalb bei den Stromschnellen von Rheinfelden seit dem Frühjahr 1895 in der Ausführung begriffen. Hier führt nach der Einmündung der wasserreichen Aare der Rhein schon bedeutende Wassermengen, welche im Mittel über 350 cbm pro Sekunde betragen und auch ziemlich konstant sind. Rheinfelden liegt etwa 15 km östlich von Basel an der linken Seite des Rheins, der auf dieser Strecke die Grenze zwischen Baden und der Schweiz bildet. Die Verhältnisse sind hier für eine Kraftanlage in großem Stile außerordentlich günstig. Zu der genannten bedeutenden Wassermenge kommt ein erhebliches Gefälle, welches in drei Stromschnellen auf eine Länge von etwa $2\frac{1}{2}$ km $6\frac{1}{2}$ bis $7\frac{1}{2}$ m beträgt. Der Plan, die Wasserkräfte des Rheines hier der Industrie dienstbar zu machen, war schon Ende der achtziger Jahre aufgetaucht, und zwar hatte man zuerst hierbei nicht die Verwendung der Elektrizität im Sinne. Dann trat die große schweizerische

Maschinenfabrik Oerlikon dem Plane näher; es drang der Gedanke durch, hier eine große Anlage zur elektrischen Kraftübertragung durchzuführen, und im Jahre 1889 bildeten diese Firma und Escher, Wyß & Co. in Zürich, Zschokke & Co. in Aarau und die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin eine Vorbereitungsgesellschaft für die Weiterführung dieses großen Unternehmens. Der Entwurf wurde aufgestellt und auch die Konzession der schweizerischen und badischen Regierung erworben. Aber die Finanzierung des Unternehmens machte große Schwierigkeiten. Endlich gelang es der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft im Jahre 1894 eine deutsche Gesellschaft zur Aufbringung des erforderlichen Kapitals zu bilden, und nach Beseitigung der letzten Konzessionsschwierigkeiten konnte im April 1895 mit der Ausführung der Arbeiten begonnen werden.

Quer zur Stromrichtung ist ein Wehr durch den Rhein gebaut worden mit einem Durchfluß von 20 m Breite, dessen Sohle 1,35 m unter der Wehrkrone liegt, und der stets offen gehalten werden soll, um der Flößerei zu dienen und die nach der Konzession selbst beim niedrigsten Wasserstande dem Rheine zu belassende Wassermenge von 50 cbm pro Sekunde abzuführen. Das Wehr erhält eine Kronenbreite von 2 m; es wird in Beton oder Bruchsteinen auf dem festen natürlichen Felsen errichtet. An dasselbe schließt sich die Mauer des Oberwasserkanals an; derselbe erhält eine Breite von 50 m und führt längs des Stromes nach dem auf der rechten Rheinseite gelegenen Turbinenhause; dicht bei letzterem befinden sich fünf Schützen und eine Schleuse. Das Motorenhaus besteht aus 20 Kammern für je eine Turbine, welche sämtlich von vornherein zur Aufstellung gelangen.



891. Turbine der Wasserkraftanlage in Rheinfelden.

Es kommen Francis-Turbinen, also Druckturbinen mit äußerer radialer Beaufschlagung, und zwar als Vollturbinen konstruiert, von Escher, Wyß & Co. zur Anwendung, welche zum Teil 55, zum Teil 68 Umdrehungen in der Minute machen und bei voller Wassermenge 840 Pferdestärken leisten. Besondere Schwierigkeiten für die Konstruktion machte der Umstand, daß das Gefälle, sowie auch die Wassermenge sehr verschieden ist, indem bei Hochwasser der Unterspiegel steigt, so daß nur $2\frac{1}{2}$—3 m Gefälle übrig bleibt, während bei Niedrigwasser das Gefälle 5 m betragen wird; die Wassermengen schwanken hierbei zwischen 25 und 17 cbm pro Sekunde. Die Turbinen sind mit je zwei gleichen Rädern von 2350 mm Durchmesser und 1240 mm Höhe versehen worden, und jedes der Räder hat 4 übereinanderliegende Kränze, von denen 2 nach oben, 2 nach unten ausgießen. Abb. 891 ist ein Vertikalschnitt durch diese großen Turbinen. Aus demselben ist zu ersehen, wie das Wasser aus den beiden untersten und den beiden obersten Kränzen nach unten bezw. nach oben und aus den vier mittleren Kränzen — den beiden oberen des unteren Rades und den unteren des oberen Rades — aus der Mitte in den gemeinschaftlichen Ablaufkanal geleitet

wird. Für die Regulierung sind von Hand zu bedienende Ringschieber, sowie selbstthätige hydraulische Reguliervorrichtungen vorgesehen. Der Betrieb soll in der Weise geregelt werden, daß bei hohem Gefälle nur die untere Turbine arbeitet, also von dem Zuflußwasser beaufschlagt wird; wenn die Wassermenge größer wird, womit, wie oben erwähnt, eine Verringerung des Gefälles verbunden ist, dann werden zunächst die beiden unteren Kränze der oberen Turbine und bei weiterer Abnahme des Gefälles auch die oberen Kränze geöffnet, so daß bei der maximalen Wassermenge alle 8 Radkränze beaufschlagt werden. Die Turbinenräder sitzen auf einer Stahlwelle, welche durch eine Zwischenwelle direkt mit den Dynamomaschinen gekuppelt sind; letztere liegen also horizontal und laufen mit 55 bzw. 68 Umdrehungen pro Minute.

Besonders sorgfältiges Studium ist auf die Wahl des Stromsystems und der Verteilungsanlage für die mittels der Wasserkraft erzeugte elektrische Energie verwandt worden; das ganze Werk ist von vornherein unter dem Gesichtspunkte der Kraftverteilung an zahlreiche große und kleine Konsumenten innerhalb eines Versorgungsgebietes von etwa 20 km um Rheinfelden herum projektiert worden. Es muß also eine bedeutende Menge elektrische Energie auf bedeutende Entfernungen mit möglichst geringen Verlusten durch ein rationell angeordnetes Leitungssystem verteilt werden, und zwar für Beleuchtung und besonders für Kraftzwecke sowie elektrochemische Betriebe, welche sich bereits in der Nachbarschaft des Turbinenhauses angesiedelt haben; dabei mußte die völlige Unabhängigkeit der einzelnen Verbrauchsstellen voneinander gewährleistet werden. Als Stromsystem ist unter Berücksichtigung aller dieser Anforderungen für die Licht- und Kraftversorgung mehrphasiger Wechselstrom oder Drehstrom, für die elektrochemischen Zwecke Gleichstrom von geringer Spannung gewählt worden, der für diese Betriebe erforderlich ist. Von den 20 Turbinen dienen 10 zum Antrieb der Drehstromdynamomaschinen mit 6800 Volt Spannung; jede leistet mit 840 Pferdestärken 580 Kilowatt, wobei der Wirkungsgrad 92% beträgt. Die anderen 10 Turbinen sind mit Gleichstromdynamos direkt gekuppelt, die bei der gleichen Leistung Strom von 90 und von 130 Volt liefern. Die mittlere jährliche Leistung der Wasserkraftanlage an den Turbinen beträgt 15000 effektive Pferdestärken, welche bei ungünstigstem Wasserstande bis auf 12000 Pferdestärken herabsinken kann. Es können also im allgemeinen von den 20 Maschinen 18 den Betrieb vollständig aufrecht erhalten, wobei zwei in Reserve bleiben. Die Fernleitung des Drehstromes erfolgt zunächst mit der ursprünglichen Spannung der Dynamos, also 6800 Volt mittels Speiseleitungen. Für dieselben werden mit starkem Eisenband armierte und mit Bleimantel versehene Kabel benutzt, welche den Strom nach neun Speisepunkten führen. Von hier aus geht der Strom in die Hochspannungs-Verteilungsleitung, welche aus oberirdischen Kupferleitungen besteht und den Strom mit der genannten Spannung zunächst nach Transformatorenstationen leitet, welche nach Möglichkeit in die Schwerpunkte einzelner Konsumgebiete gelegt werden. Hier wird der Strom auf die Verbrauchsspannung herabtransformiert, und es gehen von hier aus die sekundären Versorgungsnetze aus und zwar für die Lichtversorgung mit 220 Volt, für Kraftzwecke mit 500 Volt Spannung. Für einen späteren weiteren Ausbau des ganzen Werkes über den dargestellten Rahmen hinaus ist die Ausnutzung eines zweiten, bei diesem Bau nicht einbezogenen Gefälles des Rheines von 2,5 m ins Auge gefaßt, welches von der jetzt in Ausführung begriffenen Motorenanlage bis zur Rheinbrücke bei Rheinfelden gewonnen werden kann, aus welchem noch weitere 7000 Pferdestärken zur Verfügung stehen. Die Anlage soll im Jahre 1898 in Betrieb gesetzt werden.

Die Kraftübertragungswerke Rheinfelden stellen sich nach obigem als eine Leistung der Ingenieurkunst auf dem Gebiete der Verwertung von Wasserkräften dar, wie sie ebenso großartig wohl nur am Niagara in Nordamerika ausgeführt ist. Die Aussichten für den wirtschaftlichen Erfolg des ganzen Unternehmens sind die günstigsten.

Wenn jetzt auch noch die Industrie des Oberrheins ein still beschauliches Dasein pflegt, weil ihr der moderne Lebensnerv, die Kohle, fehlt, so kann sie doch bald in der Nähe von Rheinfelden, um ein natürliches Gravitationszentrum herum, in die lebhafte Bewegung der Weltindustrie mit hineingezogen werden. An die Stelle

der Kohle tritt das modernste Kraftelement, die Elektrizität, die der neueren Industrie frische Kräfte leiht.

Zu den bedeutendsten neueren Schöpfungen zur Ausnutzung von Wasserkräften gehören noch die Anlagen des Elektrizitätswerkes zu Tivoli bei Rom. Bei dem schon seit dem Altertume wegen seiner Naturschönheiten bekannten Tivoli, in der Campagna Romana, 28 km von Rom entfernt, befinden sich mehrere ebenso prächtige wie mächtige Wasserfälle, die schon seit längerer Zeit als Energiequelle für einzelne kleinere Industrieanlagen dienen und auch seit 1887 ein kleines Elektrizitätswerk der Stadt Tivoli betreiben. Hier führte die „Società per le forze idrauliche ad usi industriali“ Anlagen zur Ausnutzung der Wasserkräfte im großen Maßstabe aus; die Gesellschaft brachte aber ihr weitausschauendes Projekt, von hier aus die Stadt Rom mit Kraft und elektrischem Licht zu versorgen, nicht zur Verwirklichung. Dies gelang erst der Beleuchtungsgesellschaft der Stadt Rom. Die Anlage wurde von der Aktiengesellschaft Ganz & Co. in Budapest, einer der größten europäischen Firmen des Maschinenbaues und speziell der Elektrotechnik, fertiggestellt. Die zunächst nur zur Hälfte ausgenutzte Wasserkraft hat eine Wassermenge von 3,75 cbm pro Sekunde mit 110 m Gefälle; von letzterem werden die obersten 10 m für andere Zwecke gebraucht. Das Wasser wird durch ein auf einem altrömischen Viadukt angelegtes Gerinne einem Turme zugeführt, in welchem ein 40 m hohes Standrohr von 1,60 m Durchmesser aufgestellt ist; von dem unteren Ende desselben wird das Wasser durch eine Leitung nach dem Maschinenhause geleitet. Hier sind drei Gruppen Turbinen von je zwei großen zu 330 Pferdestärken und einer zu 50 Pferdestärken Leistung aufgestellt, so daß die gesamte Turbinenkraft 2040 Pferdestärken beträgt. Es sind Girard-Partialturbinen, von Ganz & Co. gebaut; die großen haben sechs Einläufe und Drehschieber, die kleinen einen Einlauf und Drosselklappe; erstere laufen mit 170, letztere mit 375 Umdrehungen pro Minute. Jede Turbine ist mit einem selbstthätigen Regulator, System Ganz & Co. versehen, der die Umdrehungsgeschwindigkeit durch Regulierung des Wasserzuflusses mit derselben Genauigkeit konstant erhält, wie bei Dampfmaschinen. Der Wasserablauf aller Turbinen geschieht unterirdisch. Jede der sechs großen Turbinen betreibt eine direkt mit der Hauptwelle gekuppelte Wechselstromdynamomaschine mit einer Leistungsfähigkeit von 200000 Watt bei 5100 Volt Spannung; die kleinen Turbinen dienen zum Betriebe der Gleichstrom-Erregerdynamomaschinen.

Hervorzuheben von deutschen Wasserkraftanlagen ist noch die zu Lauffen am Neckar. Bei der Regulierung des oberen Neckar 1885—1888 wurde, um die hohen Kosten einigermaßen zu decken, eine Anlage geschaffen, die die Ausnutzung des bei Lauffen entstehenden großen Gefälles ermöglichte. Die verfügbare Wassermenge beträgt im Mittel 40 cbm pro Sekunde mit 3,8 m Gefälle. Dasselbe wird durch fünf Turbinen von je 300 Pferdestärken Leistung ausgenutzt; es sind Kombinationsturbinen von der Maschinenfabrik Geislingen in Geislingen: der äußere Schaufelkranz ist als Reaktionsturbine nach System Jonval, der innere als Aktionsturbine konstruiert. Jeder der beiden Kränze arbeitet mit der halben Aufschlagwassermenge und leistet 150 Pferdestärken; der innere Schaufelkranz ist mit Schieberregulierung ausgerüstet, durch welche die Wassermenge im Betriebe, je nach dem zeitweiligen Kraftbedarfe oder der disponiblen Wassermenge auf 0—4000 l eingestellt werden kann, so daß alle fünf Turbinen mit der halben bis zur normalen Wassermenge, also mit 20—40 sekcbm arbeiten können. Die Turbinen versorgen eine Zementfabrik mit der erforderlichen Betriebskraft, und eine derselben betreibt eine Dynamomaschine zur Energieübertragung und elektrischen Beleuchtung der benachbarten Stadt Heilbronn, eine kleinere Turbine versorgt die Fabrik und die Stadt Lauffen mit elektrischem Licht. Die jetzt zur Lichtversorgung dienende große Maschine diente bei der Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt 1891 als Primärmaschine für die bekannte großartige Kraftfernleitung auf 180 km von Lauffen nach Frankfurt.

Um einen ungefähren Begriff über die ungeheuere Größe der natürlichen Wasserkräfte zu geben, mögen hier noch kurze Zahlenangaben über die Ergebnisse einiger Untersuchungen und Berechnungen gegeben werden.

Nach Professor Reuleaux beträgt die Arbeitskraft des Rheines vom Bodensee bis zum Meere rund 600000 Pferdestärken; diejenige des Niagara in der kurzen Strecke der Stromschnellen und des großen Wasserfalles etwa $12^1/_2$ Millionen Pferdestärken: dieses Gefälle enthält so viel Energie, wie etwa die Hälfte aller Dampfmaschinen der

Welt! Wie groß die natürlichen Wasserkräfte allein in der Schweiz sind, zeigt ein Bericht des schweizerischen Ingenieurs Lauterburg; nach demselben sind im ganzen 354 Wasserläufe mit zusammen rund 4 1/2 Millionen Pferdestärken Leistung vorhanden; technisch ausnutzbar zur Kraftgewinnung sind von denselben allerdings nur etwa 620 000 Pferdestärken; aus denselben würden sich also nach Abzug von 50 % Verluste in Turbinen und Kraftübertragung rund 300 000 Pferdestärken nutzbar gewinnen lassen.

Nordamerika besitzt, auch abgesehen von den so viel besprochenen Niagarafällen, außerordentlich viele und große Wasserkräfte, welche zum Teil in sehr großem Maßstabe industriell ausgenutzt werden. Nach amtlichen Erhebungen und Zusammenstellungen aus dem Jahre 1880 beträgt die gesamte Arbeitsleistung der Wasserkräfte in den Vereinigten Staaten nahezu 200 Millionen Pferdestärken. Im genannten Jahre wurden hiervon durch 55 400 hydraulische Motoren 1 225 400 Pferdestärken ausgenutzt; dies entspricht nur 0,6 % der disponiblen Wasserkräfte, hingegen etwa 36 % der gesamten in den Vereinigten Staaten durch Maschinen erzeugten mechanischen Arbeit. Besonders großartig sind die Wasserkraftanlagen bei der bedeutendsten Mühlenstadt der Vereinigten Staaten Minneapolis, die ihr Entstehen und ihre Blüte der Ausnutzung der Wasserkräfte des Mississippi verdankt, welcher direkt den großen Mahl- und Sägemühlen zu beiden Seiten des St. Anthony-Falles sowie durch große Oberwasser-Zuflußstollen und Unterwasser-Abflußgräben auch entfernt liegenden Werken etwa 18000 Pferdestärken liefert. In ähnlicher Weise werden an mehreren Stellen die Wasserkräfte des Merrimac River ausgenutzt, durch Verteilung von Aufschlagwasser und Schaffung von Gefälle; so in Lowell mit etwa 10 000, in Manchester mit 17 000 und in Lawrence mit 10 000 Pferdestärken. Sehr bedeutend und großartig sind auch die Wasserkraftanlagen bei Holyoke, wo etwa 60 Werke mit 21 000 Pferdestärken aus dem Connecticut River versorgt werden.

Die Dampfmaschinen und Dampfkessel, Lokomobilen, Dampfturbinen, Naphthadampfmaschinen.

Geschichtliche und technische Entwickelung der Dampfmaschinen.

Einleitung. Ältere angebliche Vorläufer der Dampfmaschinen. Beginn der wirklichen Entwickelung. Papins erste Kolbendampfmaschine. Saverys Dampfpumpe. Newcomens atmosphärische Dampfmaschine. James Watt. Erfindung des Kondensators und der doppeltwirkenden Dampfmaschine. Woolfs Maschine. Weitere Vervollkommnungen. Verbunddampfmaschine. Einführung der Dampfmaschinen in Deutschland. Entwickelung in der neueren Zeit.

In den Bestrebungen zur Beschaffung nutzbarer mechanischer Arbeitskraft hat den weitaus größten und weittragendsten Erfolg die Erfindung bezw. praktische Ausgestaltung der Dampfmaschinen gehabt. Der Einfluß der Dampfmaschinen auf die Industrie ist ein außerordentlicher, nur durch sie ist die ungeheure industrielle Entwickelung der letzten hundert Jahre möglich gewesen; ja man kann sagen, daß eine eigentliche Industrie in der üblichen Bedeutung des Wortes erst durch die Dampfmaschine geschaffen worden ist. Mit Hilfe der Dampfkraft fördern wir aus dem Innern der Erde ihre Schätze ans Tageslicht, verwandeln wir das geschmolzene Metall in unendlich verschiedene Formen. Der Dampf beschafft das Material und formt es zu den meisten unserer Werkzeuge und Geräte; er baut die Dampfschiffe, die Lokomotiven und Eisenbahnwagen, sowie ihre eisernen Schienenwege und gibt ihnen nach der Geburt der toten Gebilde das Leben, die Betriebskraft; er mahlt das Korn zu dem Brot, das wir essen; er spinnt und webt die Wolle und Baumwolle zu unserer Bekleidung. Tausende von Rädern werden durch den Dampf jahraus jahrein in Bewegung gesetzt; jedes derselben enthält in seiner Bewegung soviel Gewalt, um mit einem Schlage Menschen zu zermalmen, doch ist diese gewaltige Kraft so gefesselt und geleitet, daß eine Kinderhand im stande ist, sie durch Drehung eines Ventiles zu hemmen. Wenn es durch die Erfindung der Buchdruckerkunst möglich wurde, erfolgreich gegen Unwissenheit und Aberglauben anzukämpfen, die Schätze der Bildung und Kenntnisse von den engen Gelehrtenkreisen in die breiten Massen des Volkes zu tragen, so sind wir durch die Erfindung der Dampfmaschine in den Stand gesetzt, die Hindernisse zu

überwinden, welche früher wegen Mangel an großer, nützlich verwendbarer mechanischer Kraft dem Menschen unübersteigliche Schranken entgegenzustellen schienen.

Betrachten wir eine Dampfmaschine, so sehen wir, wie sich spielend die Kolbenstange in gleichmäßigem Takte ruhig auf- und abbewegt und eine Kurbel dreht; ein Schwungrad läuft scheinbar müßig mit herum. Alles Triebwerk erhält seine Bewegung von einer Hauptwelle; durch Räder und Getriebe, Riemen und Wellen wird die Kraft fortgeleitet und überall hin verteilt, wo man sie braucht, oft auf weite Entfernungen, in Nebengebäude, hinauf und hinab. Wenn wir fragen, mit wie viel Pferdestärken die Maschine arbeite, so hören wir bei kleineren Fabriken wohl 10, 20, 30, in größeren Werken oder bei Lokomotiven hundert oder mehrere hundert, bei Schiffsmaschinen für die modernen großen Schnelldampfer oder Kriegsschiffe sogar Zehntausende! Und diese enormen, kaum vorstellbaren Kraftleistungen scheinen auf die einfachste Weise aus zwei Mitteln zu entspringen: Kohle und Wasser. Das Wasser verdampft, und der Dampf drückt einen Kolben vor sich her; das ist das einfache Mittel zur Erreichung so großer Erfolge. Wie wir aber sehen werden, war es nicht so leicht, diese einfachen Mittel zu finden, hat es zweitausend Jahre menschlicher Geistesarbeit bedurft, ehe es gelang, die Wärme mittels des Wasserdampfes dem Menschen zur Krafterzeugung dienstbar zu machen.

Über die Erfindung der wichtigsten der Kraftmaschinen sind noch in weiten Kreisen vielfach irrige Ansichten verbreitet. Man hört häufig den Satz, die Dampfmaschine sei 1769 von James Watt erfunden; das ist aber durchaus nicht zutreffend. Wie die meisten wichtigeren Erfindungen ist auch diejenige der Dampfmaschine keineswegs einem einzelnen zu verdanken, sie ist nicht fertig dem Genie eines einzigen bedeutenden Mannes entsprungen wie Minerva aus dem Haupte des Zeus. Die Erfindung ist vielmehr schrittweise erfolgt. Vor einigen Jahren hat der bekannte hervorragende deutsche Fachmann Professor Reuleaux in einer Schrift, „Kurzgefaßte Geschichte der Dampfmaschine“, in vortrefflicher Weise die Entwickelung der Erfindung bis auf ihre ältesten Anfänge verfolgt und dargelegt, daß die Welt die Dampfmaschine keineswegs einem oder wenigen Engländern verdanke, was die englische Nation gern beanspruchen möchte; daß vielmehr die gemeinsamen Arbeiten von Italienern, Franzosen, Deutschen und Engländern nötig waren, um zu der Wattschen Dampfmaschine zu gelangen. Watt hat seine Arbeiten auf denjenigen anderer Männer aufgebaut, welche später in Vergessenheit geraten sind; sein Verdienst wird hierdurch indessen nicht verkleinert, denn es bleibt ihm allein unbedingt der Ruhm, die Dampfmaschine so ausgebildet zu haben, daß sie praktisch brauchbar wurde, und das Vorbild für die großartige spätere weitere Entwickelung geschaffen zu haben.

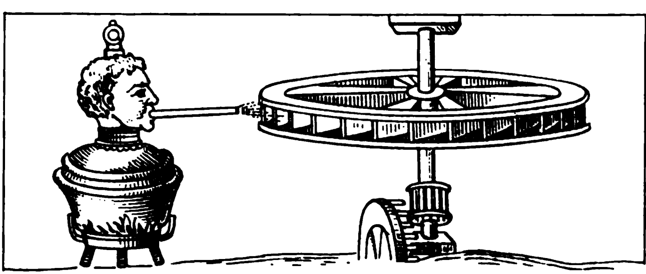
Die folgenden Darlegungen und Abbildungen sind zum Teil der genannten Schrift des Professors Reuleaux entnommen.

Die Dampfmaschine beruht auf dem Arbeitsvermögen des Wasserdampfes; dieselbe Arbeitskraft zeigt sich im täglichen Leben schon beim Kochen von Wasser in einem Topfe, und die geschäftige Legendenbildung, welche ohne Rücksicht auf geschichtliche Wahrheit bedeutende Thaten oder Erfindungen mit dem Schmucke symbolischer Sage zu umgeben liebt, hat die Erfindung Watts selbst an die Betrachtung eines Wasserkessels geknüpft. Watt soll durch die einem jeden bekannte Beobachtung, daß der Deckel eines solchen periodisch von dem entwickelten Wasserdampfe gehoben wird, die erste Idee zu seiner Erfindung gefaßt haben. Diese Kraftäußerung des Wasserdampfes ist sicherlich schon in den ältesten Zeiten bekannt gewesen, und man hat sie auch schon sehr früh gewissen Zwecken dienstbar zu machen gesucht. Die älteste Anwendung wird Archimedes zugeschrieben, der eine Dampfkanone, den „Erzdonnerer“ erfunden haben soll, aus welcher durch gespannten Wasserdampf eine Kugel aus einem Rohre geschleudert wurde, doch sind die Nachrichten hierüber zweifelhafter Natur. Es ist indessen durch die uns erhaltenen drei Bücher des Heron von Alexandrien „Von dem Luftigen“ erwiesen, daß die Alten von der Spannkraft des Wasserdampfes schon einige Kenntnisse besaßen. In denselben wurden z. B. mechanische Figurenwerke beschrieben, die durch erhitzte Luft oder Wasserdampf bewegt wurden. Bekannter ist die Heronsche Drehkugel geworden, eine hohle Metallkugel, welche zwischen zwei Zapfen drehbar ist und zwei in derselben Richtung gebogene enge Röhren

trägt; wenn aus diesen Dampf ausströmt, dreht sich die Kugel in der der Dampfausströmung entgegengesetzten Richtung, ähnlich wie das früher beschriebene Segnersche Wasserrad. Diese und ähnliche Apparate waren indessen nur Spielereien, sie können als Vorläufer der Maschinen zur praktischen Nutzbarmachung der Dampfkraft für Arbeitsleistung nicht gelten. Dasselbe gilt von einem später erfundenen Gerät, dem Äolusball, den Vitruv (um Christi Geburt) beschreibt, eine hohle Metallkugel mit feiner Öffnung, durch welche Wasser eingesogen wird, nachdem die Luft im Innern durch Erwärmen vorher verdünnt worden ist, und aus welcher nach erneuter Erhitzung Wasserdampf ausgeblasen wird. Der Äolusball blieb in der Folgezeit und durch das ganze Mittelalter ein beliebtes Kabinettstück der Gelehrten, die seine Wirkung mit Vorliebe als einen Beweis des Kraftaufwandes vorführten, mit welchem die Natur jede Umwandlung eines Elementes in ein anderes begleite.

Fast zwei Jahrtausende hindurch, bis ins 17. Jahrhundert hinein, ist kein Fortschritt in der Benutzung der Dampfkraft zu verzeichnen; man hatte eine ganz falsche Auffassung von der Natur des Wasserdampfes, indem man über die alte überlieferte Ansicht nicht hinaus kam, daß derselbe Luft sei, die durch Feuer aus dem Wasser erzeugt werde.

Es müssen hier aber doch einige Namen erwähnt werden, an welche später durch eine Reihe von Fabeln die Erfindung der Dampfmaschinen geknüpft worden ist. Der spanische Schiffskapitän Blasco de Garay soll nach spanischen Veröffentlichungen schon im Jahre 1543 eine Dampfmaschine gebaut und mit derselben sogar ein Schiff betrieben haben. Genaue und unparteiische Quellenstudien eines spanischen Geschichtsforschers haben aber in den letzten Jahren erwiesen, daß diese früheren Berichte ganz unhaltbar sind. In den fraglichen Schriftstücken, auf denen sie beruhen sollten, ist von der Dampfkraft oder einer Anwendung derselben gar keine Rede; Blasco de Garay hat nur Versuche gemacht, Schiffe mittels Schaufelräder fortzubewegen, die durch Kurbeln von Menschenhänden umgetrieben wurden.



892. Brancas Dampfrad.

Johann Branca, der als Erbauer der Kirche zu Loretto bekannt geworden ist, läßt in seinem Buche „die Maschinen“ (1629) den Dampf aus einem Äolusball gegen ein horizontales Schaufelrädchen blasen (s. Abb. 892) und durch letzteres ein kleines Stampfwerk für eine Apotheke betreiben. Auch hier fehlt die Erkenntnis des Wesens des Wasserdampfes und liegt der Gedanke der Verwandlung von Wasser in Wind durch Wärme zu Grunde. Ganz besonders sind die Franzosen bemüht gewesen, die Ehre der Erfindung der Dampfmaschine für ihre Nation allein in Anspruch zu nehmen, indem sie dieselbe Salomon de Caus zuschrieben, an dessen Namen sich auch noch andere geschichtliche Irrtümer knüpfen. Nach französischen Veröffentlichungen auf Grund angeblich sicherer Quellen und besonders eines aufgefundenen Originalbriefes aus dem Jahre 1641 sollte er als Märtyrer seiner für Tollheit erklärten Erfindung der Dampfmaschine von Richelieu in ein Irrenhaus gesperrt worden sein. Diese Veröffentlichungen riefen das größte Interesse in weiten Kreisen hervor. Der angeblich schnöde verkannte und verfolgte große Gelehrte sollte von der dankbaren Nachwelt wieder zu Ehren gebracht werden; Wissenschaft und Kunst verherrlichten ihn in Wort und Bild. Und was ist bei ruhiger sachlicher Prüfung der geschichtlichen Thatsachen von der ganzen Fabel übrig geblieben? Der angebliche Originalbrief erwies sich als unecht. Salomon de Caus, geboren gegen 1576, hat in England im Dienste des Prinzen von Wales eine Reihe von Wasserkünsten für königliche Schlösser entworfen; später war er Hofgartenkünstler des Kurfürsten Friedrich V. von der Pfalz in der Residenz Heidelberg. Er war weder ein bedeutender Gelehrter oder Erfinder noch ein Märtyrer, denn er hat nach glaubwürdigen Schriftstücken unangefochten bis zum Jahre 1626 im Dienst Ludwigs XIII. gelebt und ist in seiner Heimat gestorben. In einem 1615 erschienenen Buche „über die Ursachen der bewegenden Kräfte“ hat er außer seiner Spezialität, den Wasserkünsten, Physik und Mechanik ganz in dem Geleise der Pseudowissenschaft seiner Zeit, ohne eigene neue Gedanken und ohne besonderen Geist behandelt. Von Ideen über den Dampf oder die Anwendung desselben zu nützlichen Maschinen ist nirgends die Rede.

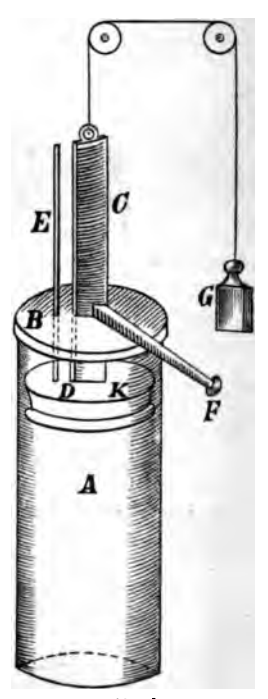
Schließlich ist hier noch der schon früher genannte Marquis von Worcester zu erwähnen, dem die Engländer die Erfindung der Dampfmaschine haben zuschreiben wollen, welcher in-

dessen in dieser Beziehung keine andere Stellung einnimmt wie de Caus. Die schon in dem ersten Abschnitte dieses Bandes besprochene „wunderbare und sehr kräftige Weise, Wasser durch Feuer aufzutreiben", die er in dem anspruchsvollen aber durchaus verworrenen und unklaren Buche über seine hundert Erfindungen beschreibt, soll die erste Dampfmaschine vorstellen. Thatsächlich enthält aber diese „Erfindung" nichts, was die Idee einer Dampfmaschine andeuten könnte; selbst der Begriff des Wasserdampfes findet sich nirgends vor. Worcester hielt, wie seine Zeitgenossen, den Dampf für Luft, die das Feuer aus dem Wasser heraustreibt.

Der eigentliche Grundgedanke und damit die wirkliche Geschichte der Dampfmaschine beginnt erst mit dem Entstehen der wirklichen Naturwissenschaft zu Ende des 16. und Anfang des 17. Jahrhunderts. Erst nachdem die Bahnbrecher der neueren Wissenschaft, Männer wie Galilei, Kepler, Baco, Toricelli, Guericke die alte scholastische Gelehrsamkeit in ihren Grundlagen erschüttert und die Bahn für eine wirkliche Naturwissenschaft eröffnet hatten, konnte sich die Erkenntnis des Wesens und der Wirksamkeit des Wasserdampfes und damit der Grundgedanke der Dampfmaschine entwickeln; die Erfindung der letzteren ist stufenweise mit der fortschreitenden wissenschaftlichen Erkenntnis, nicht als das Ergebnis glücklichen Zufalls, zustande gekommen. Nachdem Torricelli den Luftdruck entdeckt und Otto von Guericke mittels der Luftpumpe einen luftleeren Raum hergestellt hatte, richteten sich bald die Bemühungen darauf, die Kraft des Luftdruckes zur Arbeitsleistung auszunutzen. Das Verfahren Guerickes, eine Luftleere herzustellen, war praktisch nicht anwendbar, da die zur Erzeugung derselben erforderliche Arbeit ebenso groß und größer war, als die zu gewinnende Leistung. Mannigfache Versuche bis zum Ende des 17. Jahrhunderts, die Luftleere auf einfachere und leichtere Weise herzustellen, blieben erfolglos, bis Papin in der Niederschlagung des Wasserdampfes die Lösung dieser Aufgabe fand.

Dionysius Papin, ein Franzose, ist geboren 1647 zu Blois. Er war ursprünglich Arzt, ging aber zur physikalischen Wissenschaft über und war eine Zeitlang Gehilfe des großen Huyghens zu Paris; von hier ging er nach England, wurde dort Mitarbeiter Boyles und auf Grund mehrerer ausgezeichneter physikalischer Arbeiten Mitglied der Königlichen Gesellschaft für Kunst und Wissenschaft. Hier erfand er den bekannten, noch heute nach seinem Namen benannten Papinschen Topf. Derselbe ist ein starker eiserner Kochtopf, dessen Deckel fest aufgeschraubt werden kann. Beim Kochen von Wasser können die entwickelten Dämpfe nicht entweichen; es entsteht eine starke Dampfspannung, und die Temperatur des Wassers kann weit über die gewöhnliche Siedehitze von 100° C. getrieben werden, ebenso wie in einem Dampfkessel. Hierdurch kann Fleisch zur Erzeugung von Fleischbrühe viel besser ausgekocht werden, als bei den gewöhnlichen offenen oder mit leichten Deckeln lose verschlossenen Kochtöpfen. Papin wurde 1687 von dem Landgrafen Karl von Hessen als Professor für Physik und Mathematik nach Marburg berufen, und hier beschäftigte er sich mit Versuchen zur Erzeugung der Luftleere. Er konstruierte eine Pulvermaschine, bei welcher durch Abbrennen von Schießpulver ein Kolben in einem Cylinder bewegt wurde, erreichte aber keinen technischen Erfolg. Doch er sann unermüdlich nach anderen Mitteln, und es gelang ihm endlich, durch Niederschlagen von Wasserdampf mittels Abkühlung seinen Zweck zu erreichen; da nämlich Wasserdampf einen etwa 1700mal größeren Raum einnimmt, als ein gleiches Gewicht Wasser, so entsteht in einem geschlossenen Raume, der mit Wasserdampf gefüllt ist, wenn letzterer zu Wasser kondensiert wird, eine sehr starke Luftverdünnung. In einem Berichte schreibt Papin über seine Erfindung: „Da der durch Feuer erzeugte Wasserdampf die Eigenschaft hat, ebenso wie die Luft einen Druck auszuüben, aber ferner auch durch Abkühlung wieder zu Wasser sich zu verdichten vermag, so daß nichts von jenem Drucke übrig bleibt, so glaube ich, daß es nicht schwierig sein würde, Maschinen zu konstruieren, in welchen mittels des Feuers mit nicht zu großen Kosten die Kräfte des Wasserdampfes nutzbar gemacht werden könnten". Papin veröffentlichte seine Erfindung in einem ursprünglich in lateinischer Sprache herausgegebenen Buche „Ars nova" (Neue Kunst). Später gab er dasselbe auch in deutscher Sprache heraus mit dem Titel „Neue Kunst, das Wasser mit Hilfe des Feuers auf das wirksamste zu heben"; in demselben ist seine Maschine beschrieben und abgebildet. Er bediente sich einer Vorrichtung, wie sie die Papins Zeichnung nachgebildete Abb. 893

zeigt, und welche als das Vorbild der ersten eigentlichen Kolbendampfmaschine zu betrachten ist. In dem Hohlcylinder A mit Deckel B und festem Boden bewegt sich schließend der Kolben K, der an der Stange C befestigt ist; letztere geht dicht schließend durch den Deckel. Bei D ist der Kolben durchbohrt, und die Öffnung ist durch einen Stab E verschließbar, welcher durch den Deckel leicht beweglich hindurchgeht. In dem Cylinder A wird unter dem Kolben zunächst eine kleine Menge Wasser durch Erwärmen verdampft; der Kolben wird durch ein Gewicht G mittels einer über Rollen laufenden Schnur in die Höhe gezogen und in der höchsten Stellung mittels des Riegels F festgestellt. Der Wasserdampf erfüllt den ganzen Cylinderraum, nachdem die vorher darin enthaltene Luft durch die Öffnung E des Kolbens ausgeblasen ist; diese Öffnung wird jetzt durch den Stab E geschlossen, und das Feuer unter dem Cylinder wird fortgenommen. Letzterer kühlt sich ab, und der Wasserdampf schlägt sich nieder, so daß ein luftleerer Raum verbleibt; wird nun der Riegel F zurückgezogen, so drückt der äußere atmosphärische Luftdruck den Kolben nieder, wobei das Gewicht G gehoben wird und außerdem mechanische Arbeit geleistet werden kann. Hier kommt also klar der Grundgedanke der atmosphärischen Dampfmaschine zum Ausdruck; im Gegensatze zu den früheren Anschauungen ist die Natur des Wasserdampfes, die Möglichkeit, ihn wieder in Wasser zurückzuverwandeln und hierdurch Kraft zu gewinnen, erkannt. Papin muß hiernach als der eigentliche Erfinder der Dampfmaschine anerkannt werden. Er bezeichnete in seiner Veröffentlichung verschiedene Möglichkeiten der Anwendung seiner Erfindung, z. B. Wasser zu pumpen und Schiffe gegen den Wind zu rudern unter Benutzung von Schaufelrädern. Im Auftrage des Landgrafen Karl von Hessen konstruierte Papin eine Pumpmaschine, welche mit der neu erfundenen Dampfmaschine betrieben werden sollte; sie kam aber nicht zur Vollendung. Der im Jahre 1700 gegossene Cylinder für dieselbe wird noch jetzt als der älteste Dampfcylinder im Museum zu Kassel aufbewahrt; das Modell der Pumpmaschine befand sich bis 1806 ebenfalls daselbst, ging aber bei Besetzung Kassels durch die Franzosen verloren.

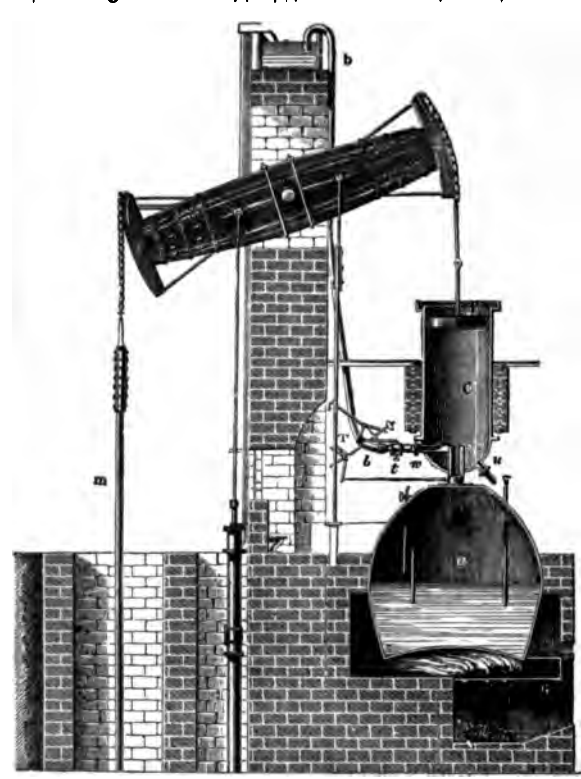


898. Papins erster Dampfcylinder.

Inzwischen hatte der Engländer Thomas Savery eine Dampfpumpe konstruiert und sich 1698 patentieren lassen, bei welcher die Spannkraft des Dampfes direkt zum Heben von Wasser ausgenutzt werden sollte. Der in einem Kessel durch Unterfeuerung erzeugte Wasserdampf wurde in einen Pumpencylinder ohne Kolben geleitet und wirkte hier abwechselnd, je nachdem die Verbindung mit dem Dampfkessel abgesperrt oder geöffnet wurde, durch Abkühlung oder Kondensation, also Erzeugung einer Luftleere, saugend oder drückend, wodurch mittels eines mit dem Pumpencylinder verbundenen Rohres mit Sauge- und Druckventil abwechselnd Wasser angesaugt und hochgedrückt wurde. Durch Verbindung zweier solcher Pumpencylinder und abwechselnde Stellung der Hähne wurde die Dampfpumpe doppeltwirkend, indem stets in dem einen Cylinder der Dampf kondensierte, also ansaugte, während er im anderen drückend wirkte. Ein bedeutender Mangel der Maschine lag in der schädlichen Kondensation des Dampfes, während er in dem Pumpencylinder drückend wirkte. Hierdurch wurde eine sehr geringe Dampfleistung erzielt, so daß die Maschine für industrielle Zwecke kaum verwendbar war. Da das Wesen der heutigen Dampfmaschinen in der Anwendung eines vom Dampfe betriebenen Kolbens zur beliebigen direkten Arbeitsleistung beruht, so kann die Saverysche Erfindung nicht als Vorläufer derselben gelten; die Maschine war lediglich ein Dampfdruckapparat zum Heben von Wasser und stellt im Prinzip das Vorbild unserer heutigen Pulsometer dar, die schon früher besprochen worden sind.

Als Papin von der Saveryschen Maschine hörte, wandte er sich, an dem Erfolge seiner eigenen Erfindung zweifelnd, dieser zu und verbesserte sie wesentlich, indem er in

den Pumpencylinder zwischen Dampf und Wasser einen Kolben einschaltete, um die Niederschlagung des Dampfes zu verhindern; auch versuchte er die Maschine für andere Arbeitsleistungen als Wasserförderung nutzbar zu machen. Er wollte besonders ein Schiff mit Schaufelrädern durch Dampfkraft betreiben, also ein Dampfschiff konstruieren. Nach mehreren erhaltenen Briefen, die er an hervorragende Gelehrte, u. a. auch an Leibniz geschrieben hat, scheint er noch viel weiter gegangen zu sein und einen Dampfkessel konstruiert zu haben, in dem gespannter Dampf erzeugt wurde, der eine Hochdruckmaschine getrieben haben soll; mittels einer Kurbel soll er bereits die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens in eine drehende verwandelt haben. Er kam aber mit seinen Versuchen nicht zu einem Erfolge; bei einem derselben zersprang durch zu hohe Spannung ein Dampftopf, und bei dieser ersten Dampfexplosion wurden große Zerstörungen angerichtet und mehrere Menschen tödlich verletzt. Papin floh vor dem Zorne des Landgrafen gänzlich mittellos mit seiner Familie nach England; das Mißgeschick verließ ihn auch hier nicht mehr, und er starb 1714 in tiefer Dürftigkeit.



894. Newcomens Dampfmaschine.

Zwei englische Handwerker, Newcomen und Cawlay, verstanden es besser, seine erfinderischen Gedanken mit praktischem Sinne zu verwerten. Sie haben nach vergeblichen Versuchen mit der Saveryschen Maschine durch Verbesserungen der Papinschen Konstruktion die erste wirkliche Dampfmaschine ausgeführt und zur praktischen Verwendung gebracht: beide verbanden sich mit Savery, und 1705 wurde ihnen auf ihre „atmosphärische Maschine“ ein Patent erteilt, welches später an Newcomen allein überging. Die Hauptverbesserung bestand darin, daß sie behufs schnellerer Kondensation des Dampfes den Cylinder durch Übergießen mit Wasser von außen abkühlten und später statt dessen direkt kaltes Wasser einspritzten. Abb. 894 zeigt die Newcomensche Maschine im Schnitt. Über dem mit einer Rostfeuerung versehenen Dampfkessel a und mit dem Dampfraume desselben oben durch einen kurzen vertikalen, mit Ventil versehenen Rohrstutzen verbunden, steht der oben offene Dampfcylinder C mit dem dichtschließenden Kolben P; die Kolbenstange des letzteren greift mittels Kette an dem bogenförmigen Ende eines Wagebalkens oder Balanciers an, der bei O mittels eines Zapfens auf einem Pfeiler oder Gerüst gelagert ist und am anderen Ende an einer Kette das Pumpengestänge m trägt. Die Bogenform beider Enden des Balanciers bewirkt, daß bei dem Ausschlage Kolbenstange und Pumpengestänge genau senkrecht sich bewegen. Der Boden des Dampfcylinders hat außer dem Dampfanschluß noch zwei Öffnungen u und w; erstere hat einen Hahn mit freiem Ausfluß, letztere ist durch das Rohr b mit Ventil t mit einem hochstehenden Behälter kalten Wassers verbunden. Wird durch Öffnen des Dampfeinströmungsventiles Kesseldampf in den Cylinder eingelassen, so drückt dieser, unterstützt durch das Gegengewicht des Pumpengestänges, den Kolben P in die Höhe. Beim höchsten Stand wird das Dampfventil geschlossen und der Wasserhahn t

geöffnet; jetzt spritzt aus der Leitung b kaltes Wasser in den Cylinder, der Dampf kondensiert und durch den äußeren Luftdruck wird der Kolben niedergedrückt und das Pumpengestänge gehoben. Das eingespritzte, sowie das kondensierte Wasser wird durch u abgelassen. Die eigentliche Kraftwirkung findet beim Niedergange des Kolbens durch die atmosphärische Luft statt, die mit 1 kg pro Quadratzentimeter Querschnitt des Kolbens diesen niederdrückt; die Maschine heißt deshalb eine atmosphärische. Der Aufgang des Kolbens wird hauptsächlich durch das Gewicht des Pumpengestänges bewirkt, die nur sehr geringe Dampfspannung übt keine bedeutende Kraftwirkung aus; die Arbeitsleistung der Maschine hängt also nur von der Größe des Kolbens ab. Die Erfindung der Einspritzkondensation, welche noch jetzt allgemein verwendet wird, ist einem Zufall zu verdanken. Newcomen übergoß anfangs zur Abkühlung den Cylinder von außen sowie auch von innen über dem Kolben mit Wasser; als einmal die Maschine ungewöhnlich schnell zu laufen anfing und man der Ursache nachforschte, stellte sich heraus, daß der Kolben undicht geworden war und an demselben vorbei von dem über ihm stehenden Wasser etwas in den unteren Cylinderteil lief, wodurch die Kondensation des Dampfes beschleunigt wurde.

Um das regelmäßige Spiel der Maschine zu bewirken, mußten nach obiger Beschreibung von einem Wärter wechselweise das Dampfzutrittsventil und das Einspritzventil t, sowie der Ablaßhahn u geöffnet und geschlossen werden. Als dem bei einer Maschine in Cornwall hierzu angestellten aufgeweckten Knaben Humphrey Potter diese Arbeit zu langweilig wurde, soll er dieselbe der Maschine selbst übergeben haben, indem er die Handgriffe der Hähne durch Schnüre mit den bewegten Teilen der Maschine verband, wodurch letztere selbst mit der größten Genauigkeit die verschiedenen Hähne zur rechten Zeit öffnete und schloß. Diese Erfindung der selbstthätigen Steuerung war von der größten Wichtigkeit, indem sie den Gang der Maschine von der unablässigen Aufmerksamkeit und Zuverlässigkeit eines Wärters unabhängig machte. Später wurde die Steuerung wesentlich verbessert und durch ein Hebelwerk T (Abb. 894) bewirkt. Um diese Zeit wurde auch ein schon früher von Papin vorgeschlagenes Sicherheitsventil praktisch eingeführt und so die Newcomensche Maschine in einen für die damalige Zeit recht brauchbaren Zustand gebracht; sie wurde vielfach in England zum Wasserheben in Bergwerken angewendet, zum erstenmal 1712 in einer Steinkohlengrube der Grafschaft Warwick und hielt sich in dieser Form 60 Jahre lang ohne wesentliche Änderungen. Fitzgerald versuchte die schwingende Bewegung des Balanciers durch Zahnräder und Sperrwerke auf eine rotierende Welle mit Schwungrad zu übertragen; Brindley machte den Versuch einer selbstthätigen Kesselspeisung.

Die Newcomensche Feuermaschine litt an zwei Hauptmängeln: durch die Abkühlung des Cylinders bei der Wassereinspritzung ging viel Wärme verloren, und die Anwendung blieb auf den Betrieb von Pumpwerken beschränkt; immerhin war sie für diese Verwendung ein vorteilhafter Motor und blieb in Deutschland an manchem Ort bis zum Ende der dreißiger Jahre unseres Jahrhunderts, in England hier und da noch viel länger in Gebrauch.

Ein vollständiger Umschwung, eine neue Ära in der Entwickelungsgeschichte der Dampfmaschine begann erst durch den genialen Schotten James Watt, der die Newcomensche Maschine derart verbessert und die Dampfmaschinen auf einen solchen Grad der Vollkommenheit brachte, daß sie der im Entstehen begriffenen Industrie die zu einer lebhaften Entwickelung notwendige Kraftquelle für alle nur möglichen Anwendungsarten verschaffen konnte. Bis in die neueste Zeit sind an der Dampfmaschine bezüglich des Wirkungsprinzips und selbst in den Hauptteilen keine wesentlichen bedeutenden Verbesserungen erfunden worden, so daß Watt mit Recht als der zweite Erfinder, ja eigentlich als der Schöpfer der Dampfmaschinen in der Anordnung bezeichnet werden kann, wie sie seit langer Zeit für Industrie und Gewerbe unentbehrlich geworden ist.

Bisher waren die Fortschritte im Dampfmaschinenbau nur auf dem empirischen Wege gemacht worden; es waren aus den gemachten Erfahrungen heraus allmählich von Fall zu Fall einzelne Verbesserungen der Maschinen, bald an diesem, bald an jenem Einzel-

teile, im Material, in der Bearbeitungsweise vorgenommen worden. Das eigentliche Wirkungsprinzip der Maschinen war aber nicht erkannt worden, und man hatte sich wohl kaum rechte Mühe gegeben, es auf wissenschaftlichem Wege zu erkennen; eine Dampfmaschinentheorie gab es nicht, auch nicht in den Anfängen. Freilich bot früher auch der allgemeine Stand der Wissenschaft noch kaum die Mittel, um zu einer solchen gelangen zu können; nur wenige erleuchtete Männer hatten erst begonnen, an Stelle der alten, unfruchtbaren Ansichten neue Lehren über die Wärme und die Natur und Eigenschaften des Wasserdampfes zu setzen. Durch diese Fortschritte in der Wissenschaft erst wurde das Rüstzeug gewonnen, die Wirkung der Dampfmaschinen in ihren Ursachen zu untersuchen, eine Theorie zu bilden und aus dieser heraus neue Verbesserungen praktisch einzuführen. Mit dem Beginn der erfolgreichen wissenschaftlichen Untersuchungen der



895. James Watt.

Wirkungsweise der Dampfmaschine wurden in wenigen Jahren größere Fortschritte gemacht, als durch die Empirie in den vorhergegangenen hundert Jahren.

Der Anfang dieser neuen Periode ist bezeichnet durch den Namen James Watt. Dieser wurde 1736 zu Greenock in Schottland geboren. Schon von seiner frühesten Jugend an war er ein Denker und Grübler; er beschäftigte sich schon als Kind, anstatt zu spielen, mit mathematischen Aufgaben und benutzte seine Spielzeuge nicht, um sich wie andere Kinder, daran zu ergötzen, sondern um sie mit Hilfe einer kleinen Werkzeugsammlung zu zerlegen und wieder zusammenzusetzen. Mit sechzehn Jahren verließ er die ihm eigentlich bestimmte wissenschaftliche Laufbahn und trat in eine Mechanikerwerkstatt in seiner Vaterstadt in die Lehre; vier Jahre später trat er zu seiner weiteren Ausbildung in eine ähnliche Werkstatt in London ein. Er brauchte zur Reise dahin zwölf Tage und ahnte damals schwerlich, daß man sie dereinst kraft seiner Erfindung in zwölf Stunden werde zurücklegen können. In London blieb er nur ein Jahr, worauf er nach Glasgow zurückging und später (1756) als Mecha-

niker bei der Universität zur Ausbesserung der physikalischen Instrumente beschäftigt wurde. Bald erkannte man hier, daß der bescheidene Mechaniker ein hervorragender Geist war, und seine Werkstatt im Universitätsgebäude wurde der Versammlungsort der bedeutendsten Männer der Wissenschaft Glasgows.

Ein Zeitgenosse, der mit Watt in sehr innige Verbindung trat, erzählt: „Ich wurde — ein Freund mathematischer und mechanischer Studien — durch einige Bekannte bei Watt eingeführt. Ich erwartete einen einfachen Arbeiter und fand anscheinend auch einen solchen; wie sehr aber sah ich mich überrascht, als ich bei näherer Prüfung in ihm einen Gelehrten erkannte, der, nicht älter als ich, dennoch im stande war, mich über alle Gegenstände der Mechanik und Naturkunde aufzuklären, nach denen ich fragte. Ich glaubte in meinem Studium weit vorgeschritten zu sein und fand nun, daß Watt hoch über mir stand. So auch meine Genossen. Jede Schwierigkeit, welche uns vorkam, trugen wir Watt vor, und er war immer im stande, uns zu belehren, aber für ihn wurde jede solche Frage der Gegenstand eines neuen und ernsten Studiums, und er ruhte nicht eher, als bis er sich entweder von der Unbedeutsamkeit des Gegenstandes überzeugt, oder das daraus gemacht hatte, was sich daraus machen ließ. Diese Eigenschaften, verbunden mit der größten Bescheidenheit und Herzensgüte, machten, daß alle seine Bekannten ihm mit der herzlichsten Liebe und Anhänglichkeit zugethan waren."

Wie es scheint, begann Watt in den Jahren 1762 und 1763, wo er mehrere Versuche mit dem Papinschen Topfe machte, mit dem Wesen und der Verwendbarkeit des Dampfes sich anhaltender zu beschäftigen; aber erst das folgende Jahr war dazu bestimmt, ihn auf die Bahn seines Ruhmes zu führen. In der Sammlung der Universität befand sich das Modell einer Dampfmaschine von Newcomen, dessen man sich zur Erläuterung bei den Vorlesungen bediente. Dies Modell konnte indessen nicht in Gang gesetzt werden, und man trug Watt auf, dasselbe in Ordnung zu bringen. Er löste seine Aufgabe zu vollkommener Zufriedenheit; sein Eifer blieb aber nicht hierbei stehen. Er war einer der fleißigsten Schüler des Professors Joseph **Black**, der 1763 die Lehre von der freien und der gebundenen (latenten) Wärme, sowie von der spezifischen Wärme aufstellte, die einen höchst bedeutsamen Fortschritt in der Wärmetheorie brachte; durch Blacks Vorträge wurde Watt nach seiner eigenen Aussage auf die glänzenden Verbesserungen der Dampfmaschine gebracht. Im Jahre 1764 gab er seine Stellung an der Universität auf, um sich als selbständiger Ingenieur mit mehr Muße seinen Arbeiten hingeben zu können. Er erkannte bald, worin die Mangelhaftigkeit der Wirkung von Newcomens Maschine ihren Grund hatte. Die Maschine verlangte, wie wir gesehen haben, kaltes Wasser, um unter dem Kolben den Dampf zu verdichten und einen möglichst leeren Raum herzustellen. Dadurch aber ergab sich für den nächsten Kolbenhub der Übelstand, daß der Dampf, wenn er mit den soeben durch das Wasser abgekühlten Cylinderwänden und der Kolbenfläche in Berührung trat, vorzeitig abgekühlt und kondensiert wurde, was einen beträchtichen Dampfverlust bewirkte. Diese Erkenntnis führte ihn zu seiner bedeutendsten Erfindung, der eines besonderen Niederschlagapparates außerhalb des Cylinders, des **Kondensators**, in welchen der Dampf, nachdem er im Cylinder seinen Effekt ausgeübt, geleitet und verdichtet wurde. Im Jahre 1774 verband sich Watt mit **Boulton**, und in einer Maschinenfabrik zu Soho bei Birmingham wurden in der Folgezeit die Erfindungen Watts wirtschaftlich ausgenutzt und technisch vervollkommnet; lange Zeit gingen aus diesen Etablissements fast alle Dampfmaschinen hervor, die in England und dem größten Teile von Europa sowie auch in Amerika verwendet wurden, und bis heute haben die Werke ihren wohlbegründeten Ruf bewahrt. Watt selbst arbeitete unablässig an neuen Erfindungen und Verbesserungen für seine Dampfmaschine; die früher gebauten Dampfmaschinen waren fast ausschließlich zum Heben von Wasser in den Bergwerken benutzt worden, und man hatte, wie schon oben erwähnt, den Pumpenkolben unmittelbar an den Balanciers dem Dampfkolben gegenüber, gehängt. Dabei aber fehlte es nicht an Unregelmäßigkeiten und Unsicherheiten in deren Gange, und Watt war gleich anfangs bemüht, diesem Übel abzuhelfen und die Ungleichheiten, welche namentlich bei dem Wechsel des Auf- und Niederganges der Kolbenstangen stattfanden, zu beseitigen. Es gelang ihm dies auch vollkommen, indem er durch Anwendung einer **Kurbel** die geradlinige Bewegung des Kolbens in die rotierende einer Welle umsetzte und von der

Maschine ein auf letztere gesetztes schweres eisernes Rad, das **Schwungrad**, umtreiben ließ, welches, wenn es einmal in Bewegung gesetzt war, nach dem mechanischen Gesetze des Beharrungsvermögens diese Bewegung eine kurze Zeit behielt, wenn auch die bewegende Kraft aufhörte. Dadurch wurden die Zwischenpausen, wo die Maschine von einer Bewegung in die andere übergeht, also eigentlich nicht arbeitet, die **toten Punkte** ausgefüllt und der Gang der Maschine gleichmäßig und ruhig. Von der Welle des Schwungrades wurden nun auch diejenigen Teile getrieben, welche die Kraft der Maschine den einzelnen Verwendungsarten zuführen sollten. Hier muß aber zur Steuerung unrichtiger Ansichten bemerkt werden, daß Watt nicht Kurbel und Schwungrad erfunden hat; dieselben waren vielmehr schon bekannt und auch angewendet worden. Durch die Anwendung der Kurbel wurde der Dampfmaschine ein neues weites Feld für ihre Verwendung geöffnet, indem sie jetzt für alle möglichen Arbeitsleistungen als Antriebsmaschine benutzt werden konnte. Eine weitere wichtige Erfindung Watts war das „**Parallelogramm**“, ein Maschinenteil, der noch heute nach seinem Erfinder genannt wird, durch welchen trotz der um einen Punkt schwingenden, also bogenförmigen Bewegung des Balanciers die mit letzterem verbundene Kolbenstange genau geradlinig vertikal geführt wird; es ersetzt also die bei der Newcomenschen Maschine beschriebene Vorrichtung, daß die Kolbenstange mittels Kette an dem bogenförmigen Ende der Balanciers angreift. (Nähere Beschreibung folgt noch.)

Die wichtigste Erfindung war aber der Übergang von der einfachwirkenden zur **doppeltwirkenden Dampfmaschine**. Die ersten Maschinen Watts gingen, wie wir gesehen haben, aus Verbesserungen der Newcomenschen Maschine hervor; es waren atmosphärische Maschinen, bei denen der Dampf nur von einer Seite in den Cylinder unter den Kolben trat; der Grundgedanke war die Benutzung des Dampfes zur Erzeugung eines luftverdünnten Raumes, und man arbeitete demgemäß nur mit ganz schwach gespanntem Dampfe; der Kolben wurde nur von der anderen Seite durch den Luftdruck getrieben. Durch diesen nur einseitigen Kraftantrieb war eine Ungleichförmigkeit der Bewegung bedingt; Watt versuchte dieselbe anfangs dadurch zu vermindern, daß er zwei Maschinen auf dieselbe Welle arbeiten ließ und beide Kurbeln so gegeneinander verstellte, daß der eine Kolben seinen Krafthub machte, während der andere zurückging. Erst nach 14 Jahren, im Jahre 1784 kam Watt auf den Gedanken, daß auch in dem schwach gespannten Kesseldampfe Spannkraft vorhanden sei und zwar größere, als der atmosphärische Luftdruck. Schon früher hatte er bei der einfachwirkenden Maschine Dampf auch über den Kolben geführt, aber nur um die abkühlende Wirkung der Luft auf die Cylinderwand und den Kolben zu vermeiden. Jetzt dagegen bewirkte er durch eine neue Dampfzuleitungs- und Ventilstellungskonstruktion, daß frischer Arbeitsdampf abwechselnd unter und über den Kolben trat, während jedesmal auf der anderen Seite des letzteren dem Abdampf eine Ausströmung geöffnet wurde, aus welcher er in den Kondensator gelangte; die Dampfmaschine arbeitete also jetzt gleichmäßig beim Auf- und Abgange des Kolbens, sie war doppeltwirkend geworden. Gleichzeitig hiermit führte Watt einen Gangregler, den „**Regulator**“ ein. In den bisherigen Maschinen lag eine Quelle der Unzuträglichkeiten darin, daß man nicht im stande war, das Feuer stets gleichmäßig stark zu unterhalten. Die Dampferzeugung und mithin der Dampfzufluß konnten dabei ebenfalls nicht immer gleichmäßig bleiben, und die Maschine arbeitete bei verschieden starker Dampferzeugung und ebenso auch bei wechselndem Kraftbedarf mit verschiedener Schnelligkeit. Watt suchte dem Übel dadurch abzuhelfen, daß er eine stellbare Klappe (Drosselklappe) in der Leitung anbrachte, welche den Dampf vom Kessel zur Maschine führte, und dieselbe durch einen Arbeiter stets einstellen ließ. Sehr bald zeigte es sich aber, daß die geringste Unaufmerksamkeit dieses Arbeiters die Maschine gefährden könne, und es kam darauf an, auch diese Arbeit durch die Maschine selbst regulieren zu lassen. Dies geschah durch den Wattschen Regulator, der bereits im ersten Abschnitt dieses Bandes besprochen ist.

Nicht direkt von Watt, aber unter seinem Einfluß wurde von einem Ingenieur der Boulton & Wattschen Maschinenfabrik an Stelle der Ventilsteuerung die **Schiebersteuerung** mit Excenterantrieb gesetzt.

Die Wattschen Dampfmaschinen in den Ausführungen von Boulton & Watt waren in ihrer Art recht gut und schön und müssen als Mustermaschinen angesehen werden. Sie haben sich sehr lange ohne erhebliche Änderungen in der Konstruktion erhalten; erst gegen Ende der fünfziger Jahre verschwanden sie so ziemlich, doch einzelne Exemplare sollen noch hier und da, nach mehr als hundertjährigem Bestehen, in Betrieb sein. Eine genauere Beschreibung, sowie Abbildungen der Wattschen Maschine werden weiterhin gegeben.

James Watt teilte nicht das traurige Los mancher anderer Erfinder z. B. des bedauernswerten Papin; er hatte vielmehr die schönsten Erfolge und die Freude, seine Maschine als anerkannt vorzüglichste Kraftmaschine in den weitesten Kreisen angewandt zu sehen, auch noch auf See- und Flußschiffen als Schiffsmaschinen. Im Jahre 1800 trat er von der Leitung der Werke zurück und lebte seitdem auf seinem Landhause Heathfield bei Birmingham seinen Studien und der Erholung und starb 1819 im Alter von 83 Jahren. Seine Zeitgenossen haben ihm, wie bei Lebzeiten, so auch nach seinem Tode die verdiente Anerkennung nicht versagt. Das englische Volk hat ihm in der Westminsterabtei zu London, der Ruhmeshalle Englands, eine marmorne Bildsäule errichtet mit folgender Inschrift:

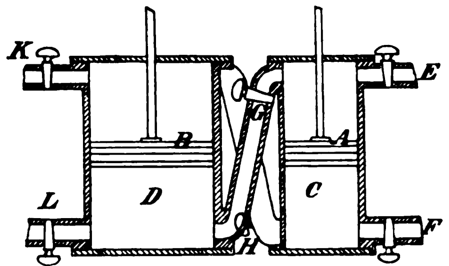
James Watt
welcher die Kraft seines schöpferischen,
in wissenschaftlichen Forschungen früh geübten Geistes
wandte auf die Verbesserung der Dampfmaschine,
dadurch die Hilfsquellen seines Landes erweiterte,
die Kraft des Menschen vermehrte,
und sich zu einem hervorragenden Platze erhob
unter den berühmtesten Männern der Wissenschaft und den
wahren Wohlthätern der Welt.

Die Weiterentwickelung der Wattschen Maschine erfolgte hauptsächlich in der Richtung, mit **höherem Dampfdruck**, als den bisher verwendeten von nur $1/2$ bis höchstens 1 Atmosphäre Überdruck zu arbeiten. Bei dieser geringen Dampfspannung wurden für größere Leistungen zu große Kolben erforderlich; bei höherem Dampfdruck dagegen wird nicht nur eine größere Wirkung, sondern auch eine bessere Wärmeausnutzung erzielt, indem die Dehnkraft oder Expansivkraft des Dampfes mit benutzt werden kann. Die dahin gehenden Bestrebungen begannen schon im vorigen Jahrhundert; Watt selbst hatte schon in den siebziger Jahren Versuche gemacht, die Expansivkraft des Dampfes auch bei der von ihm verwendeten geringen Dampfspannung auszunutzen, indem er vor Schluß des Kolbenhubes den Dampfzutritt absperrte, so daß für den Rest des Hubes der Dampf ohne frische Zufuhr durch Ausdehnung noch Arbeit leistete. Durch höhere Dampfspannung mußte aber ein viel größerer Vorteil hieraus gewonnen werden können. Gegen Hochdruckmaschinen hatte Watt jedoch eine große Abneigung, und dieser ist es zuzuschreiben, daß nicht schon damals sein genialer Mitarbeiter der Schotte Murdoch, der Erfinder der Steinkohlengasbeleuchtung, Hochdruckmaschinen zum Betriebe von Lokomotiven einführte.

Im Jahre 1781 entwarf der Engländer **Hornblower** eine zweicylindrige Dampfmaschine, bei welcher der mit höherer Spannung arbeitende Dampf aus einem kleineren Kolben, nachdem er hier unter vollem Druck gewirkt, in einen größeren Cylinder treten sollte, um noch weiter durch seine Expansivkraft Arbeit zu leisten. Hornblower konnte aber seine Erfindung nicht ausführen, da er den Kondensator beibehalten wollte, welcher Boulton & Watt patentiert war. Zu Anfang des 19. Jahrhunderts fing die Einführung der einfachen Hochdruckmaschine ohne Kondensation an; man verzichtete auf letztere und nahm den dadurch bedingten Wärmeverlust in den Kauf, um kräftigere, kleinere und einfachere Maschinen mit höherer Dampfspannung zu erhalten.

Ein wichtiger Fortschritt war die Konstruktion der **Zweicylindermaschine** von Arthur **Woolf** im Jahre 1804. Die Idee ist zwar nicht von Woolf erfunden, wie schon erwähnt, hatte schon früher Hornblower dieselbe gehabt, und es waren später auch bereits solche Maschinen ausgeführt worden, die jedoch wegen konstruktiver Mängel keinen Erfolg hatten. Woolf aber konstruierte zuerst Zweifach-Expansionsmaschinen in recht vollkommener Weise und mit vielem Erfolg, so daß dieses Dampfmaschinensystem, welches

bis heute ohne wesentliche Verbesserungen vielfach in Anwendung geblieben ist, mit Recht seinen Namen trägt. Bei der Woolfschen Maschine arbeitet der frische, hochgespannte Dampf aus dem Kessel zuerst mit teilweiser Expansion in dem kleineren von zwei Dampfcylindern, dem Hochdruckcylinder; nach dem Hubwechsel, beim Rückgange des Kolbens, tritt der Dampf nicht in den Kondensator, oder ins Freie, sondern in einen zweiten größeren Dampfcylinder, in dem er durch weitere Ausdehnung noch arbeitleistend auf den Kolben wirkt; dann erst wird er im Kondensator niedergeschlagen. Abb. 896 zeigt schematisch die Woolfsche Anordnung für eine Balanciermaschine. Beide Cylinder C und D stehen nebeneinander; ihre Kolbenstangen arbeiten hier auf den Balancier in derselben Entfernung vom Mittelpunkte, sie haben also gleichen Hub; — sie können auch hintereinander stehen, dann hat natürlich der der Balanciermitte näher liegende einen entsprechend kleineren Hub — der Inhalt des größeren Niederdruckcylinders ist der dreifache bis fünffache des Hochdruckcylinders. Der frische Kesseldampf strömt durch die hier nur schematisch angedeuteten Kanäle E oder F in den kleinen Cylinder; ist z. B. E geöffnet, F geschlossen, so drückt der Dampf den Kolben A nieder. Der Hahn G des Verbindungsrohres nach dem Cylinder D ist geschlossen, dagegen der Hahn H geöffnet, und es strömt durch diesen beim Niedergehen des Kolbens A der unter ihm befindliche Dampf von der vorigen Cylinderfüllung in den Niederdruckcylinder über den Kolben und drückt auch diesen nieder. Von den Auslaßhähnen des Niederdruckcylinders ist K geschlossen, L offen, durch letzteren gelangt der unter dem Kolben B befindliche Dampf nach dem Kondensator. An Stelle der Hähne hat man sich eine von der Maschine selbst betriebene Steuerung zu denken; beim Ende des Hubes werden die Ein- und Ausströmungen umgesteuert, so daß das umgekehrte Kolbenspiel stattfindet.



896. Cylinderanordnung der Woolfschen Maschine mit nebeneinander liegenden Cylindern.

Theoretisch haben solche Zweifach-Expansionsmaschinen vor einfachen Kondensationsmaschinen eigentlich keinen Vorteil, da man auch bei letzteren den Dampf von der vollen Kesselspannung bis auf Null expandieren lassen kann, wenn man nur früh genug bei jedem Hube die Dampfzuströmung absperrt, also nur so viel Dampf hinter den Kolben treten läßt, daß derselbe nach vollendetem Hube den Cylinderraum ohne Druck ausfüllt. Hierbei müßte dieselbe Arbeitsmenge gewonnen und noch die Reibung eines Kolbens und einer Kolbenstange erspart werden. Praktisch sind aber hiermit größere Nachteile verbunden; wenn bei hohem Kesseldruck beim Beginn des Hubes (Admissionsspannung) auf der anderen Seite des Kolbens keine Spannung vorhanden ist, so ist es bei der großen Differenz des Dampfdruckes zu beiden Seiten des Kolbens schwerer, letzteren dicht zu halten, und man kann das Dichthalten und die damit verbundene Verminderung des Dampfverlustes nur dadurch erreichen, daß man den Kolben sehr straff im Cylinder gehen läßt, wodurch Reibung und Kraftverlust entsteht; von großer Bedeutung ist ferner der Umstand, daß mit den hohen Spannungsdifferenzen auch große Temperaturunterschiede verbunden sind und hierdurch schnell vor sich gehende schädliche Wärmeübertragungen durch die Cylinderwandung entstehen Beim Einströmen des hochgespannten, frischen Kesseldampfes in den durch die vorhergegangene Expansion abgekühlten Cylinder kondensiert ein Teil des Dampfes, wodurch beträchtliche Wärme- und Arbeitsverluste entstehen; wird die Expansion dagegen auf zwei Cylinder verteilt, dann sind die Temperaturunterschiede viel geringer.

In baulicher Beziehung erfuhren die Dampfmaschinen in jener Zeit — zu Anfang des 19. Jahrhunderts — mannigfaltige Abänderungen; es wurden Maschinen ohne Balancier gebaut, bei denen also der Kolben durch Triebstange und Kurbel direkt die Schwungradwelle in Drehung setzte; da diese Anordnung für die meisten Anordnungsarten vorteilhafter ist, als die Konstruktion mit Balancier, so wurde diese Bauart sehr bald allgemein verbreitet, besonders als man bald darauf auch dazu überging, liegende Dampfmaschinen auszuführen. Früher waren die Maschinen der verschiedenen Konstruktionen fast ausschließlich in stehender Anordnung hergestellt worden; man hatte befürchtet, daß bei horizontalem Cylinder durch das Gewicht des Kolbens schnell ein einseitiges Ausschleißen des Cylinders verursacht und so die Dichtung des Kolbens mangelhaft

würde. Diese Befürchtung war nicht ganz unberechtigt, aber es zeigte sich bald, daß der Übelstand nicht so schlimm ist und sich auch durch geeignete Führung des Kolbens beseitigen läßt. Gegen 1820 wurde auch schon die erste Dampfmaschine mit oscillierendem Cylinder hergestellt; bei denselben ist der Cylinder um zwei Zapfen beweglich, und die Kolbenstange greift ohne Zwischenglied (Pleuelstange) direkt an der Kurbel an, die seitlichen Bewegungen bei der Drehung der Kurbel werden durch das Hin- und Herschwingen des Cylinders um seine beiden Zapfen ermöglicht.

Vom Jahre 1807 ab fand die Dampfmaschine eine sehr bedeutsame neue Anwendung, nämlich zum Betriebe von See- und Flußschiffen, indem in diesem Jahre der Amerikaner Fulton zuerst einen regelmäßigen Dampfschiffbetrieb mit seinem Raddampfer Clermont einrichtete. In Europa kam einige Jahre später, 1812, das erste Dampfschiff auf dem Clydeflusse in Schottland zur Anwendung. Im Jahre 1817 fuhr der erste Dampfer auf dem Rheine und 1819 der erste Seedampfer in Europa auf dem Adriatischen Meere auf der Strecke Venedig-Triest. Im Jahre 1819 kreuzte auch der erste Ozeandampfer den Atlantischen Ozean auf der Fahrt von New York nach Liverpool. In dieselbe Zeit fällt der Beginn der Dampf-Eisenbahnen; im Jahre 1814 wurde von Stephenson mit der ersten brauchbaren Lokomotive die Dampfmaschine für den Eisenbahnbetrieb praktisch mit Erfolg eingeführt. Die Lokomotiven sowie auch die Lokomobilen werden weiterhin noch besonders näher besprochen.

In neuerer Zeit ist der wichtigste Fortschritt im Dampfmaschinenbau, abgesehen von den vielfachen konstruktiven Verbesserungen in Einzelteilen, auf welche hier nicht näher eingegangen werden kann, die Erfindung der Receiver-Compounddampfmaschine, oder Verbunddampfmaschine. Eine solche ist eine Mehrfach-Expansionsmaschine, bei denen zwei oder noch mehr Cylinder in der Weise kombiniert sind, daß der Dampf nacheinander in denselben durch Expansion Arbeit leistet; zuerst tritt der frische Kesseldampf mit voller Spannung in den kleineren oder Hochdruckcylinder und hierauf in einen oder mehrere Niederdruckcylinder, in denen er durch weitere Expansion sein Arbeitsvermögen ganz abgibt; nach der Zahl der Cylinder, in die der Dampf nacheinander eintritt, hat man Zweifach-, Dreifach- und in neuester Zeit auch Vierfach-Expansionsmaschinen. Die alte Woolfsche Zweicylindermaschine war auch im allgemeineren Sinne eine Verbundmaschine; dieselbe wird aber nicht zu den Verbundmaschinen im engeren Sinne des Wortes gerechnet, sondern bildet unter ihrem Namen (Woolfsche Maschine) ein besonderes System; von demselben unterscheiden sich die eigentlichen Receiver-Verbundmaschinen wesentlich. Bei der Woolfschen Maschine tritt der Dampf aus dem kleinen Cylinder direkt in den großen Cylinder und zwar während des ganzen Hubes; hierdurch ist bedingt, daß beide Kolben genau in derselben Zeit in gleicher oder entgegengesetzter Richtung ihren Hub vollenden müssen, sie haben also gleichzeitig ihren Hubwechsel und ihren toten Punkt und arbeiten entweder stets in gleicher Richtung auf Kurbeln in gleicher Stellung an derselben Seite der Welle, oder in entgegengesetzter Richtung auf aufeinander gerade gegenüberstehende Kurbeln; es findet also kein Ausgleich in der Leistung beider Kolben statt; Maximum und Minimum der Arbeitsleistung beider Kolben fällt zusammen, so daß die Woolfsche Zweicylindermaschine in dieser Beziehung genau wie eine Eincylindermaschine arbeitet. Bei der Verbundmaschine dagegen ist in die Dampfleitung zwischen einem Cylinder und dem folgenden ein besonderer Behälter, der Receiver (ein deutscher Name hierfür ist bis jetzt nicht eingeführt) eingeschaltet; hierdurch sind beide Cylinder bis zu einem gewissen Grade voneinander unabhängig gemacht; der Dampf aus dem kleinen Cylinder sammelt sich in dem Receiver, und der große Cylinder erhält, unabhängig von der Kolbenstellung des kleinen, diesen niedrig gespannten Dampf zugeführt. Jeder Kolben kann in Bezug auf den anderen eine beliebige Stellung haben, die Kurbeln können also beliebig gegeneinander gestellt werden, und man stellt sie bei Zweifach-Verbundmaschinen rechtwinkelig zu einander; auf diese Weise arbeitet stets der eine Kolben in der mittleren Stellung mit größter Kraft auf die Welle, wenn der andere sich beim Hubwechsel oder toten Punkte befindet. Auf diese Weise wird also der Gang der Maschine ein gleichmäßigerer, und man kann sie, wie eine Zwillingsmaschine, aus jeder beliebigen Stellung

direkt anlassen (in Gang setzen), da nie beide Kolben gleichzeitig im toten Punkte sich befinden können, wie dies bei Eincylindermaschinen und Woolfschen Maschinen vorkommen kann. (Eine moderne Receiver-Verbundmaschine wird noch später dargestellt und besprochen.) Durch entsprechende Wahl des Durchmessers beider Cylinder und des Dampfdruckes, mit welchem sie arbeiten, kann man es einrichten, daß beide Kolben die Hälfte der Arbeit leisten und daß die Summe der Kraftleistung beider zusammen in jedem Augenblicke eine wenig veränderliche mittlere Größe hat.

Die erste Idee zur Dampfmaschine mit successiver Expansionswirkung in mehreren Cylindern rührt, wie wir gesehen haben, von Hornblower her (1781); Woolf verbesserte diese alte einfachwirkende Zweifach-Expansionsmaschine 1804 durch Anwendung der Doppelwirkung und höherer Dampfspannung wesentlich durch Konstruktion der Woolfschen Maschine; über die Erfindung der Receiver-Verbundmaschine oder Verbundmaschine schlechtweg ist indessen viel weniger Genaues bekannt. Als Erfinder wird meist der Engländer Henry Wolf (nicht zu verwechseln mit Arthur Woolf) bezeichnet, welcher 1834 ein englisches Patent auf eine solche erhielt; es ist aber nachgewiesen, daß er nicht selbst die Erfindung gemacht hat; er war vielmehr nur Vertreter — wir würden heute sagen Patentanwalt — eines fremden Erfinders, wie in dem englischen Patent selbst bemerkt ist. Zu derselben Zeit ist auch ein französisches Patent auf dieselbe Erfindung an die Maschinenfabrik von Andre Kochelin & Co. in Mülhausen i. Elsaß ohne Zusammenhang mit Wolf erteilt worden; aber auch von dieser Firma war die Erfindung nicht ausgegangen, denn es handelte sich um ein „Einführungspatent“; die Firma Kochelin war also ebenfalls nur Zwischenhändlerin oder Lizenzinhaberin. Als der eigentliche Erfinder der Verbundmaschine muß Roentgen angesehen werden, der in den dreißiger Jahren Direktor der Schiffsbauanstalt zu Fijenoord (Holland) war, und als dessen Vertreter nach neueren Forschungen Wolf das Patent genommen hat.

Es mögen hier noch einige Angaben über die erste Einführung und Verbreitung der Dampfmaschinen in Deutschland Platz finden.

Die ersten Dampfmaschinen in Deutschland sind, wie leicht erklärlich, aus England eingeführt worden und zwar die erste schon im Jahre 1785 von der Königlichen Mansfeldschen Bergbehörde für den Friedrich-Wilhelm Schacht bei Hettstedt. Einige Jahre darauf, 1788, wurde der Dampfbetrieb in dem Bleierzbergwerk Friedrich bei Tarnowitz eingeführt; diesen folgten bald Dampfbetriebsanlagen auf verschiedenen anderen Bergwerken. Ebenso wie in England sind also auch in Deutschland die Dampfmaschinen zuerst für Bergwerksbetriebe angewendet worden. In Westfalen wurde im Jahre 1801 auf der Saline Königsborn bei Unna eine importierte Wattsche Dampfmaschine und auf der Kohlenzeche Vollmond bei Bochum eine in Schlesien gebaute Newcomensche atmosphärische Maschine aufgestellt. Letztere wurde für den Maschinenbau in Westfalen von großer Bedeutung. Bei der Montage war nämlich ein intelligenter Zimmermann Franz Dinnendahl mit thätig; derselbe erwarb sich bei der Arbeit eine solche Kenntnis dieser Maschine, daß er im stande war, selbst bei Steele eine Werkstatt zum Bau von Dampfmaschinen zu etablieren; es ist dies die erste Dampfmaschinenfabrik und der Anfang der großen Dampfmaschinenindustrie Westfalens gewesen. Dinnendahl baute nur Maschinen zu Pumpzwecken für Bergwerke; die Cylinder und sonstigen Gußsachen wurden in der schon damals bestehenden Gutehoffnungshütte zu Sterkrade bei Oberhausen gegossen; dort wurden auch auf Drehbänken, die durch Wasserkraft betrieben wurden, die Dampfcylinder ausgebohrt. Allerdings waren diese ersten deutschen Dampfmaschinen noch ziemlich roh und primitiv; die Balanciers wurden aus eichenen Balken hergestellt. Nach den alten Geschäftsbüchern der Gutehoffnungshütte sind in den Jahren 1808—1819 eine Reihe von Dampfcylindern, Kolben, Schwungrädern, Ventilen u. s. w. an Dinnendahl für verschiedene westfälische Bergwerke geliefert worden, darunter auch schon für Fördermaschinen. Seit 1819 nahm die Gutehoffnungshütte welche 1808 aus dem Besitze der Witwe Krupp an die Herren Jacobi, Haniel und Huyßen übergegangen war, unter der Leitung ihres Dirigenten Burg selbst den Bau von Dampfmaschinen auf, und zwar wurde zuerst eine vollständige Gebläsemaschine für den eigenen Gebrauch gebaut. Von da ab entwickelte sich der Dampfmaschinen-

bau der Firma Jacobi, Haniel & Huyßen besonders für den Bergbau in hervorragender Weise, und bis heute ist die Gutehoffnungshütte auf diesem Gebiete in erster Reihe geblieben.

Ein anderes Werk, welches ebenfalls schon sehr früh mit großem Erfolg den Dampfmaschinenbau, auch hauptsächlich für die westfälischen Bergwerke, begonnen hat, ist die Isselburger Hütte von Johann Nering, Bögel & Co. bei Empel am Niederrhein. Höchst merkwürdig, und für den heutigen Techniker kaum glaublich, war damals das Verfahren bei der Herstellung von Dampfmaschinen. Ein technisches Bureau im heutigen Sinne gab es nicht, genaue Zeichnungen und Pläne für die Werkstatt waren unbekannt; während heute von jeder Maschine nicht nur eine Hauptzeichnung, sondern Einzelzeichnungen von jedem Stück hergestellt werden, nach denen die Gegenstände gegossen oder geschmiedet und dann bearbeitet werden, um schließlich auf Grund der Zusammenzeichnung oder des Montageplanes zusammengesetzt zu werden, wurden damals in der Werkstatt von dem Leiter und dem Werkstättenmeister die Gegenstände auf ein Brett skizziert und hiernach angefertigt, den Plan der ganzen Maschine, die Beschaffenheit jedes Teiles mußte man im Kopfe haben. Welcher tüchtigste Ingenieur oder Werkmeister würde heute dies noch fertig bringen? Und doch klappte nachher alles, wenn die einzelnen Teile zusammengesetzt wurden.

Um dieselbe Zeit, wie der Dampfmaschinenbau, wurde auch der Dampfkesselbau in Deutschland heimisch. Die erste Kesselschmiede, welche der Ausgangspunkt der später so bedeutenden rheinisch-westfälischen Kesselschmieden und dadurch ebenso wie die Einführung des Dampfmaschinenbaues von größter Bedeutung für das ganze Land geworden ist, wurde von dem auch als Abgeordneter und Politiker bedeutenden und in weiteren Kreisen bekannt gewordenen Fr. Harkort, der auch das erste Puddelwerk Westfalens ins Leben rief, zu Wetter a. d. Ruhr begründet. Es mußten hierzu englische Vorarbeiter herangezogen werden, denn Kesselschmiedearbeiten waren den deutschen Arbeitern noch ganz unbekannt, und die Herstellung eines dichten Dampfkessels galt geradezu als ein schwieriges Kunststück. In der Harkortschen Kesselschmiede wurden unter Anleitung der englischen Lehrmeister zuerst deutsche Kesselschmiede herangebildet, und eine Reihe von späteren hervorragenden rheinischen und westfälischen Dampfkesselfabrikanten sind aus dieser Schule hervorgegangen.

In neuerer Zeit sind die Dampfmaschinen hauptsächlich in England, Deutschland, Frankreich, Belgien, Nordamerika und, nicht in letzter Reihe, in der Schweiz weiter ausgebildet und zu ihrem heutigen hohen Grade von Vollkommenheit geführt worden. Es würde zu weit führen, auch nur die hervorragendsten Ingenieure und Maschinenfabriken zu nennen, welche hierbei hauptsächlich beteiligt waren. Es sei nur noch erwähnt, daß durch die von dem Amerikaner Corliß und in Europa von Gebrüder Sulzer iu Winterthur eingeführten Ventildampfmaschinen mit Präzisionssteuerung seit Mitte der sechziger Jahre ein Umschwung im modernen Maschinenbau, besonders in Deutschland, eingeleitet worden ist; die erste Ventildampfmaschine von Gebrüder Sulzer wurde im Jahre 1867 gebaut und auf der damaligen Pariser Weltausstellung ausgestellt, wo sie großes und berechtigtes Aufsehen erregte; allgemeiner, besonders in Deutschland, wurde sie indessen erst durch die Wiener Ausstellung 1873 bekannt; sie wurden das Vorbild zu zahlreichen anderen guten Konstruktionen mit Ventil-Präzisionssteuerung.

Fassen wir im großen und ganzen die Entwickelung zusammen, die die Dampfmaschine seit Watt erfahren hat, so muß als Hauptzug in erster Linie die Steigerung des Dampfdruckes bezeichnet werden; in zweiter Linie die Einführung der Hochdruckmaschinen, also die Verzichtung auf die Kondensation bei kleineren Maschinen und in sonstigen besonderen Fällen. Die Erhöhung der Dampfspannung war eine notwendige Folge der gesteigerten Anforderungen, die an die Kraftleistung der Maschinen gestellt wurden; mit den früheren Niederdruckmaschinen konnten solche Leistungen, wie sie später verlangt wurden, nicht erzielt werden; schon für mittlere Leistungen nach unseren Begriffen würden solche Maschinen zu große Abmessungen erhalten müssen. Je höher die Dampfspannung ist, desto mehr Pferdestärken lassen sich in einem Kessel unterbringen — wenn dieser un-

wissenschaftliche Ausdruck hier gestattet sei — und mit einer Dampfmaschine von gewisser Größe erzeugen. Auf den Seedampfern ist man deshalb neuerdings in dem Maße, wie die Forderungen an die Maschinenleistung höher und höher gingen, mit der Dampfspannung auf 12, 15, selbst bis 18 Atmosphären gestiegen.

An dem eigentlichen Wirkungsprinzip der Dampfmaschinen ist seit Watts Zeiten bis in die neueste Zeit nichts geändert worden; in den letzten Jahren erst sind Vorschläge gemacht oder ältere Ideen zum Teil mit Erfolg in die Praxis übergeführt worden, um den Wasserdampf als Träger und Umwandlungsmittel von Wärme und Energie auf andere Weise auszunutzen, als dies bei den bisherigen Dampfmaschinen geschah; hierüber wird weiterhin noch Näheres ausgeführt.

Bevor wir zu der näheren Besprechung der Dampfmaschinen übergehen, mögen noch zuerst die Dampfkessel besprochen werden, welche einen wesentlichen und wichtigen Teil jeder Dampfmaschinenanlage bilden.

Die Dampfkessel und Dampfkesselfeuerungen.

Entwickelung der Dampfkessel. Großwasserraum- und Röhrenkessel. Die Kesselfeuerungen. Ausnutzung der Brennmaterialien. Gasfeuerung. Verschiedene Heizgase. Flüssige Heizmaterialien. Dampfkesselsysteme. Walzenkessel. Zirkulationskessel. Flammrohrkessel. Kombinierter Flammrohrkessel mit Gallowayröhren. Sieder- oder Bouilleurkessel. Batterie- oder Etagenkessel. Kombinierte Feuerrohrkessel. Lokomobilkessel. Wasserröhrenkessel. Kombinierte Wasserröhrenkessel. Stehende Kessel. Verwertung geringwertiger Brennmaterialien. Unterwindgebläse. Staubkohlenfeuerung. Kessel mit Petroleumfeuerung. Ausrüstung der Dampfkessel. Kesselstein und dessen Verhütung. Dampfkesselexplosionen.

Bei den ältesten Dampfmaschinen war, wie wir gesehen haben, der Dampferzeuger mit der Maschine direkt verbunden. Watt trennte beide und legte später schon die Dampfmaschine in einen besonderen abgetrennten Raum. Seit langer Zeit ist es mit gewissen Ausnahmen allgemein üblich, die Dampfkessel für sich getrennt von der Dampfmaschine aufzustellen und zu betreiben. Die beiden wichtigsten Ausnahmen, bei denen Kessel und Dampfmaschine untrennbar organisch miteinander verbunden sind, bilden die Lokomotiven und die Lokomobilen. Bei ersteren ist der Grund ohne weiteres selbstverständlich, und auch bei den Lokomobilen ist die Verbindung durch den Verwendungszweck geboten: die Lokomobile soll jederzeit und überall in Betrieb gesetzt werden können; zu diesem Zweck ist es notwendig, daß der Betriebsdampf für die Maschine mit derselben Einrichtung beschafft wird. Dasselbe gilt für die Dampffeuerspritzen, Dampfwinden u. dgl.

Mit den Fortschritten im Dampfmaschinenbau sind auch stetig die Dampfkessel verbessert und ausgebildet worden und zwar einerseits bezüglich Bauart und Konstruktion des eigentlichen Kessels, sowie der Einzelheiten (Zubehörteile, Armatur), anderseits bezüglich möglichst günstiger Ausnutzung der Brennmaterialien, also der Feuerungskonstruktionen.

Mit der Einführung der Hochdruckdampfmaschinen mußten die Dampfkessel zunächst der Bedingung entsprechen, einem hohen inneren Druck widerstehen zu können. Bis Anfang der vierziger Jahre begnügte man sich mit einem Dampfdrucke von 3 Atmosphären; jetzt wird bei Landkesseln am meisten ein Druck von 6—8 Atmosphären benutzt, während bei Schiffskesseln im allgemeinen 10 Atmosphären als unterste Grenze bezeichnet werden kann. In den vierziger Jahren, als die höheren Dampfspannungen in Anwendung kamen, begann auch schon ein Kampf zwischen zwei im Prinzip sehr verschiedenen Kesselsystemen, der bis heute weitergeführt wird, nämlich der Großwasserraumkessel und Röhrenkessel. Hiermit ist schon gleich eine Haupteinteilung der Dampfkessel bezeichnet: zu den ersteren gehören die gewöhnlichen horizontalen Walzenkessel, die sogenannten kombinierten Walzenkessel, nämlich Gegenstrom- und Siederohr- oder Bouilleurkessel und die Flammrohrkessel. Die gewöhnlichen Großwasserraumkessel sind in der Konstruktion und auch in der Bedienung einfacher als die Röhrenkessel; bei ihrem großen Inhalt hocherhitzten Wassers können sie, dem Bedarf entsprechend, sehr schnell große Mengen Dampf

entwickeln, was bei wechselndem Dampfbedarf wertvoll ist; bei der Einfachheit ihrer Konstruktion sind Reparaturen nur selten erforderlich. Aber gerade in dem Vorzug des großen Wasser- und Dampfraumes liegt auch ihre schwache Seite, nämlich eine größere Explosionsgefahr bei hohem Drucke; die Möglichkeit einer Explosion kann selbst durch beste Konstruktion und Ausführung und alle Vorsichtsmaßregeln, wie die Erfahrung immer wieder lehrt, nicht unbedingt ausgeschlossen werden; die zerstörenden Wirkungen einer solchen sind aber bei einem Großwasserraumkessel viel schlimmer als bei einem Röhrenkessel. Die ersten Konstruktionen von Wasserrohrkesseln reichen bis in die Entwickelungszeit der Hochdruckdampfmaschinen zurück; sie verschwanden aber bald wieder, da ihr Vorzug der geringeren Explosionsgefahr durch viele Nachteile aufgehoben wurde; die Konstruktion war eine mangelhafte, indem die Röhren und Dichtungen zu schnell zerstört wurden, wodurch häufige betriebstörende und kostspielige Reparaturen bedingt wurden; es fehlte diesen Kesseln an der nötigen Wasser- und Dampfreserve, welche die Großwasserraumkessel in genügendem Maße besaßen; bei etwas starker Beanspruchung der Kessel wurde von dem Dampfe Wasser mitgerissen und in die Maschine geführt, was für die Dampfmaschinen die schädlichsten Folgen hat. In neuerer Zeit aber, seit etwa 20 Jahren, seitdem man bei den Mehrfachverbundmaschinen zur Anwendung höherer Dampfspannungen, über 6, bis 10, 12 Atmosphären übergegangen ist, sind die Wasserrohrkessel wieder mehr in den Vordergrund getreten; die neueren, teils bedeutend verbesserten, teils ganz neuen Konstruktionen hatten zwar und haben jetzt noch mit dem alten noch nicht völlig überwundenen und gewiß auch von vornherein nicht unberechtigten Mißtrauen zu kämpfen, aber sie haben sich doch Bahn gebrochen und werden jetzt, besonders für hohe Dampfdrucke vielfach mit gutem Erfolge angewendet. Besonders seit Anfang der neunziger Jahre wird der Kampf zwischen denselben und den Großwasserraumkesseln mit erhöhter Heftigkeit geführt. Die Erfahrungen haben gezeigt, daß auch bei unexplodierbaren Kesseln zwar Unfälle durch Zerplatzen von Wasserröhren vorkommen können, durch welche die unmittelbare Umgebung, das Bedienungspersonal, verletzt oder getötet werden kann, daß aber Unfälle größeren Umfanges, die Zerstörung in der Umgebung anrichten, ausgeschlossen sind. Aus diesem Grunde und auch, weil die Wasserröhrenkessel für eine bestimmte Leistung einen kleineren Raum einnehmen, eignen sie sich besonders für Dampfanlagen innerhalb dichtbebauter Stadtteile, sowie bei beschränktem Raume. Anderseits werden in neuerer Zeit auch Großwasserraumkessel für sehr hohe Dampfspannungen, bis mehr als 12 Atmosphären hergestellt; da beide Kesselsysteme zweifellos bestimmte Vorzüge haben, so kann man nicht allgemein das eine als das unbedingt und für alle Fälle bessere bezeichnen, und es wird wohl auch in Zukunft nicht das eine vollständig siegen und das andere verdrängen; die modernen Wasserröhrenkessel sind noch in der Entwickelung begriffen, und durch konstruktive Verbesserungen werden wohl noch Mängel beseitigt oder verringert werden.

Ein besonderer Wert wird in neuerer Zeit auf eine gute, rationelle Feuerung zur Erzielung einer möglichst vollkommenen Ausnutzung der Brennmaterialien gelegt. Während man in letzterem Bestreben schon lange und, wie wir später sehen werden, mit bestem Erfolge das Augenmerk auf die Verbesserung der Dampfmaschinen, also die Erreichung eines möglichst geringen Dampfverbrauches gerichtet hat, ist man erst seit etwa Anfang der achtziger Jahre allgemein bestrebt, auch bei der Dampferzeugung, also bei den Dampfkesselfeuerungen, die Heizkraft der Brennmaterialien besser auszunutzen. Von der Verbrennungswärme der als Brennmaterial für Dampfkessel in erster Linie und für die europäischen Länder, mit Ausnahme der petroleumreichen Gegenden Rußlands, fast allein in Betracht kommenden Steinkohlen wird stets nur ein gewisser Teil zur Dampferzeugung, also zur Übertragung auf die Dampfmaschine nutzbar gemacht. Auch bei vollkommener Verbrennung der Kohlen ist ein Wärmeverlust durch Ausstrahlung unvermeidlich; ferner geht stets Wärme mit den durch den Schornstein entweichenden heißen Verbrennungsgasen verloren. Durch geeignete Wärmeisolierung des Kessels läßt sich aber die Ausstrahlung auf ein geringes Maß reduzieren und durch zweckmäßige Konstruktion des Kessels, speziell der Feuerzüge kann die Temperatur der abziehenden Rauchgase so

niedrig gehalten werden, daß sie eben noch zur Erzeugung des erforderlichen Zuges ausreicht. Größer als diese sind meist die durch unrichtige Führung des Verbrennungsprozesses entstehenden Verluste, die durch mangelhafte Konstruktion der Feuerungseinrichtung oder unrationellen Betrieb derselben verursacht werden können. Zwei Hauptfehler kommen hierbei in Betracht: unvollkommene Verbrennung und Luftüberschuß. Durch zu geringe Luftzuführung oder durch zu niedrige Temperatur wird keine vollkommene Verbrennung der Kohlen bewirkt, während nur hierbei deren ganze Verbrennungswärme frei wird. Die Kohlen verwandeln sich bei der Verbrennung zuerst in Kohlenoxydgas, und wenn nicht genügend atmosphärische Verbrennungsluft zugeführt wird, entweicht dieses mit einer großen Menge nicht ausgenutzter latenter Wärme aus dem Schornstein; dasselbe findet statt, wenn die Temperatur im Verbrennungsraume nicht hoch genug ist, um das Kohlenoxyd zur Verbrennung zu bringen. In den meisten Fällen, auch bei vielen Versuchen sogenannter „rauchverzehrender Feuerungen", wird genügend Luft zugeführt, nur kühlt dieselbe die Feuergase (Kohlenoxyd) bis unter den Entflammungspunkt ab, so daß dieselben, mit der Luft gemischt, ohne Verbrennung entweichen. Anderseits ist bei vollkommener Verbrennung ein Überschuß von Luft schädlich, indem diese den Verbrennungsgasen Wärme entzieht und nutzlos durch den Schornstein fortführt, und außerdem auch den Zug beeinträchtigt. Die Frage der besseren Ausnutzung der Brennmaterialien, der rauchlosen Verbrennung, gehört seit einiger Zeit zu den meist besprochenen in der Technik, und auch im öffentlichen wirtschaftlichen Leben, denn abgesehen von der großen ökonomischen Bedeutung ist die Frage auch allgemein wichtig wegen der mit dem Wachsen der Industrie in den Städten immer größer und in Fabrikstädten unerträglicher werdenden Rauch- und Rußbelästigung. Seit etwa Mitte der achtziger Jahre ist eine große Anzahl von neuen Feuerungskonstruktionen erfunden worden, die eine rauch- und rußlose vollkommene Verbrennung und damit eine hohe Ausnutzung der Kohlen bewirken sollen. Manche Versuche und Konstruktionen haben sich schon als im Prinzip verfehlt, noch mehr als zwar auf richtiger theoretischer Grundlage beruhend, aber praktisch unbrauchbar erwiesen; immerhin sind im letzten Jahrzehnt bedeutende Fortschritte auf diesem Gebiete gemacht worden und immer neue Erfolge werden von den Feuerungstechnikern erzielt. Verschiedene Konstruktionen sind mit gutem Erfolge in die Praxis eingeführt worden, und die meisten namhaften Dampfkesselfabriken haben ihr eigenes System „rauchverzehrender Feuerung", doch es würde zu weit führen, auf dieselben hier näher einzugehen; einzelne werden weiterhin noch besprochen.

Eine den theoretischen Anforderungen entsprechende wirklich vollkommene, rauch- und rußlose Verbrennung, ohne schädlichen Luftüberschuß wird wohl auch von der besten Feuerungseinrichtung für feste Brennmaterialien niemals, sondern nur mit gasförmigen Brennmaterialien erreicht werden. Wir wollen hier die Verwendung derselben zu technischen Feuerungen, speziell zum Dampfkesselbetrieb, kurz besprechen. Bei derselben ist die Aufgabe einer vollkommenen rauch- und rußfreien Verbrennung theoretisch und praktisch längst gelöst, indem man ein bestimmtes Heizgas mit der bekannten genau richtig bemessenen Menge Luft innig mischen und dann verbrennen kann, wobei nur die gasförmigen letzten Verbrennungsprodukte, Kohlensäure und Wasser, ohne die geringste Rauchbildung entstehen, also der größte mögliche Heizeffekt erzielt wird. Der verstorbene große Werner von Siemens hat schon vor längerer Zeit die vollständige Verdrängung der festen Brennmaterialien durch gasförmige als zu erstrebendes Zukunftsideal der Heizung bezeichnet und durch seine hervorragenden Arbeiten auf diesem Gebiete viel dazu beigetragen, ihm näherzukommen. Vorläufig liegt aber die praktische allgemeine Erreichung dieses Zieles noch in der Ferne und zwar aus wirtschaftlichen Gründen. Trotz der großen technischen Vorzüge ist nämlich die Gasheizung in den meisten Fällen, so z. B. fast stets für Dampfkessel gegenüber den Kohlen trotz deren technisch unvollkommeneren Verbrennung noch zu teuer. Bei einzelnen Betrieben dagegen, wo es auf eine hohe gleichmäßige Hitze ankommt, ist die Gasheizung schon seit längerer Zeit vielfach eingeführt, so im Eisenhüttenwesen bei den Puddel-, Schweiß- und Wärmeöfen, bei den Retortenöfen in der Gasfabrikation und den Glasöfen.

Für die Gasheizung in technischen Großbetrieben kann natürlich das teuere Steinkohlen- oder Leuchtgas der städtischen Gasanstalten nicht in Frage kommen; man wendet Generatorgas oder Wassergas — letzteres besonders in ausgedehntem Maße in Amerika — noch vorteilhafter aber Wassergeneratorgas oder Kohlendioxydgeneratorgas an.

Bei eigentlichen Gasfeuerungen werden diese Gase im großen besonders hergestellt und dann in die Feuerung geleitet.

Gewöhnliches Generatorgas wird durch unvollkommene Verbrennung von Kohlen erzeugt. Man füllt in einen hohen senkrechten Schacht Kohlen und zündet dieselben von unten her an; beim Verbrennen der untersten Schicht entsteht Kohlenoxyd sowie Kohlendioxyd (Kohlensäure); letztere nimmt beim Durchstreichen der über der unteren glühenden Schicht liegenden Kohlen wieder Kohlenstoff auf und wird so ebenfalls zu Kohlenoxyd reduziert. Das Kohlenoxydgas wird aus dem Generator fortgeleitet und mit dem erforderlichen Luftquantum, der sekundären Verbrennungsluft gemischt verbrannt. Das Kohlenoxyd hat eine geringere Verbrennungswärme als die Kohle, die Bildung ist „exothermisch“, d. h. es wird bei der durch die anfängliche unvollkommene Verbrennung der Kohlen Wärme erzeugt, wodurch die gebildeten Heizgase eine sehr hohe Temperatur (etwa 2000° C) haben; wenn das heiße Generatorgas direkt mit dieser hohen Temperatur zur Verwendung kommt, also aus dem Generator direkt in die Feuerung geführt wird, wie dies bei den Generatoröfen für die Leuchtgasfabrikation der Fall ist, dann wird diese Bildungswärme mit ausgenutzt; wenn aber das Gas erst durch lange Rohrleitungen geführt und vielleicht noch in einem Vorratsbehälter gesammelt wird, dann geht dieser Teil der Verbrennungswärme der Kohlen mit etwa 30% verloren.

Das umgekehrte Verhältnis findet statt bei der Darstellung von Wassergas; dasselbe entsteht bei der Durchleitung von Wasserdampf durch glühende Kohlen oder Koks, indem sich das Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt; letzterer verbindet sich mit der Kohle zu Kohlenoxyd; Wassergas ist also eine Mischung von Wasserstoff und Kohlenoxydgas. Bei der Zerlegung des Wasserdampfes wird Wärme gebunden und zwar mehr, als bei der gleichzeitigen Bildung des Kohlenoxyds frei wird; die Bildung des Wassergases ist hierdurch endothermisch, d. h. es muß Wärme zugeführt werden. Dies geschieht dadurch, daß zuerst die Kohlen ins Glühen gebracht, der Generator „angeblasen“ wird, ehe die Gasbereitung durch Zuleitung von Wasserdampf beginnt. Das Wassergas nimmt also Wärme auf, und sein Heizeffekt ist deshalb höher, als derjenige des Generatorgases.

Durch Verbindung beider Prozesse erhält man das Wassergeneratorgas; die bei der Generatorgasbildung frei werdende Wärme wird in nutzbare latente Wärme oder Energie übergeführt, indem man mit der Luft so viel Wasserdampf zuleitet, als durch die überschüssige Wärme in Wassergas verwandelt werden kann. Die bei der exothermischen Generatorgasbildung frei werdenden etwa 30% der Verbrennungswärme der Kohlen werden also zu der endothermischen Wassergaserzeugung benutzt und so in bleibend nutzbare Form gebracht. Dasselbe findet statt bei der Darstellung des Kohlendioxydgeneratorgases, indem statt des Wasserdampfes Kohlensäure, und zwar die abziehenden Heizgase einer Feuerung mit der Luft vermischt in den Generator geleitet wird; die Heizgase werden von den glühenden Kohlen zu Kohlenoxyd reduziert, welches mit dem übrigen Generatorgas gewonnen wird.

Für die Heizung von Dampfkesseln behauptet sich aber trotz der technischen Vorzüge der Verwendung solcher Heizgase, wie schon oben bemerkt, in erster Linie die Kohle heute und auch noch für die nächste Zukunft als das Heizmaterial der Industrie. Nur in einzelnen Fällen, unter besonders günstigen Verhältnissen, hat sich das Gas für die Heizung von Dampfkesseln einzuführen vermocht, wenn z. B. Heizgas sehr billig als Nebenprodukt eines anderen Betriebes, wie bei Kokereien, gewonnen werden kann. Selbst bei sehr großen Betrieben und ungünstiger Ausnutzung der Kohlen durch unvollkommene Feuerungsanlagen sind diese doch im allgemeinen wirtschaftlich der Gasfeuerung überlegen. So berichtet Professor Riedler, daß in einer sehr großen amerikanischen Anlage, wo stündlich die ungeheure Menge von 80000—200000 kg Kohlen verbrannt werden, nach sehr sorgfältigen Untersuchungen unter Zuziehung erster Fachautoritäten die technisch unvollkommenere Kohlenfeuerung sich der weit vollkommeneren Gasheizung wirtschaftlich überlegen erwies. Nach der Entdeckung und Aufschließung der großen natürlichen Gasquellen in Nordamerika, in der Nähe von Pittsburg und anderen Industriestädten, entstand vielfach die Ansicht, daß in der ganzen dortigen Industriegegend bald die Kohle als Brennmaterial von dem billigen, durch große, viele tausend Meter lange Rohrleitungen von den Quellen den Verwendungsstellen zugeleiteten Naturgase vollständig verdrängt

würde; die meisten großen Eisenwerke und sonstigen industriellen Anlagen verwenden aber dort heute noch wie früher Kohlen als Heizmaterial, und diejenigen Werke, welche eine Zeitlang Gasfeuerung eingeführt hatten, sind zum größten Teile längst wieder zur Kohle zurückgekehrt, weil sich der Betrieb mit derselben billiger stellt.

Auch flüssige Heizmaterialien gestatten eine bessere Ausnutzung als die festen; Rohpetroleum, Naphtha u. dgl. verbrennen in geeigneten Feuerungen vollkommen und fast ohne Rauch und Ruß; aber auch diese Brennmaterialien können im allgemeinen wirtschaftlich mit den Kohlen nicht in Wettbewerb treten. Selbst in den Öldistrikten bei Buffalo und Cleveland, wo das Rohpetroleum von den Petroleumquellen direkt in Rohrleitungen den Industrieorten zugeführt wird, hat dasselbe für industrielle Feuerungen nur in geringem Umfange Verwendung gefunden; sogar die großen Petroleumpumpstationen selbst verwenden Kohlen für ihre Kesselfeuerungen. Nur unter besonderen Umständen kann Petroleum an Stelle der Steinkohlen treten; solche liegen z. B. in den Ölgegenden bei Baku (Rußland) vor; hier sind die Kohlen teuer, da sie von weit her beschafft werden müssen, dagegen sind die Gewinnungskosten des Rohpetroleums bei den billigen Landerwerbskosten und niedrigen Arbeitslöhnen sehr gering; hier ist denn auch die Petroleumfeuerung in großem Umfange eingeführt.

Ein besonderer Grund zur Anwendung von Petroleum oder dergleichen zur Dampfkesselfeuerung liegt vor, wenn es sich darum handelt, mit kleinen Feuerungen große Heizwirkungen zu erzielen; zu diesem Zwecke ist flüssiges Heizmaterial sehr vorteilhaft. Aus diesem Grunde werden deshalb auch viele schnellfahrende Kriegsschiffe, also besonders Torpedoboote, Torpedojäger u. s. w. mit Einrichtungen zur Feuerung mit Petroleumrückständen (Masut) versehen. In der deutschen Kriegsmarine ist die Einführung der Masutheizung seit 1894 nach erfolgreichen Versuchen geschehen, während bei der italienischen und französischen Marine solche Versuche schon früher gemacht worden waren. Die Einrichtungen sollen nicht für den gewöhnlichen Betrieb an Stelle der Kohlenfeuerungen treten; sie sollen vielmehr nur in besonderen Fällen zur Vergrößerung der Dampferzeugung und damit Erhöhung der Maschinenleistung in Anwendung kommen, wenn es sich darum handelt, Parforcefahrten mit der größtmöglichen Geschwindigkeit zu machen. — Die Petroleum- oder Masutheizung hat einen bedeutend höheren Heizeffekt als die Kohlenfeuerung; sie erzeugt fast keinen Rauch und ist in der Bedienung viel einfacher und bequemer, so daß viel geringere Anforderungen an die Heizer gestellt werden. Dampfkesselfeuerungen für Verwendung von Petroleum werden noch weiterhin besprochen.

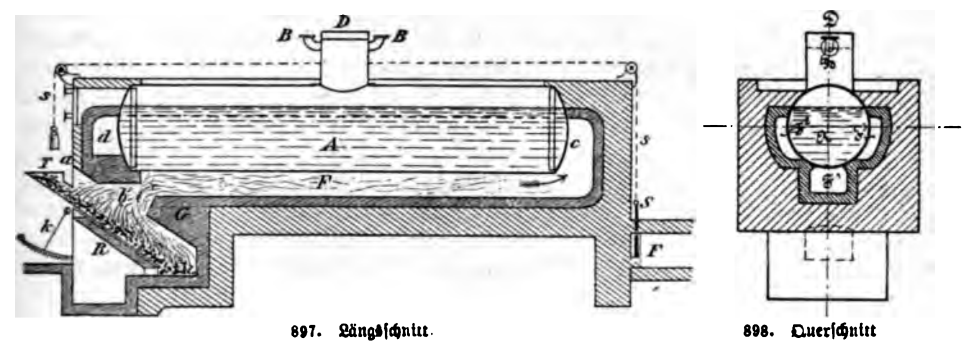
Kehren wir nach dieser Abschweifung zu den Dampfkesselkonstruktionen selbst zurück.

Verschiedene Dampfkesselsysteme.

Eine systematische, übersichtliche Klassifizierung der Dampfkessel ist schwierig oder kaum angängig, da zu viele Punkte bezüglich Wirkungsweise, Bauart und Konstruktion in Betracht kommen; von verschiedenen Standpunkten aus kann man für die Dampfkessel verschiedene Einteilungen aufstellen, von denen jede ihre Berechtigung hat. Dagegen ist es nicht möglich, unter Berücksichtigung dieser verschiedenen Standpunkte alle wichtigen Merkmale der verschiedenen Systeme und Konstruktionen von Dampfkesseln in befriedigender Weise in eine übersichtliche Einteilung zusammenzufassen. Wir wollen deshalb auf eine systematische Klassifizierung verzichten und nur die wichtigeren Systeme besprechen.

Am weitaus gebräuchlichsten sind die horizontalen Dampfkessel; die einfachste Form derselben ist der Walzenkessel, den Abb. 897 schematisch im Längsschnitt und Abb. 898 im Querschnitt darstellt. A ist der cylindrische Kessel mit gewölbtem vorderen und hinteren Boden und dem Dampfdom D; in letzterem sammelt sich der Dampf, der aus einem der beiden Rohrstutzen B nach der Dampfmaschine geleitet wird; mit dem anderen Stutzen wird ein Sicherheitsventil verbunden, welches wie die übrigen Ausrüstungsteile der Dampfkessel, später noch besprochen wird. Der dargestellte Kessel ist vollständig eingemauert und mit einem schrägen Treppenrost R versehen; die Kohlen werden von oben

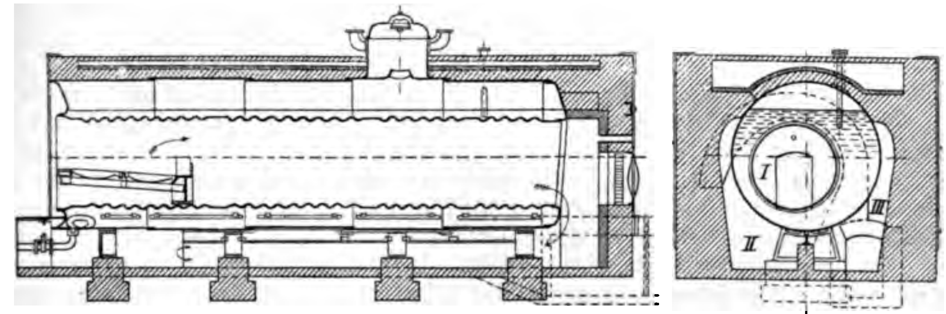
durch den Trichter T eingefüllt, so daß der ganze Rost mit ihnen in einer gewissen Höhe bedeckt ist; durch die Spalten des Rostes tritt atmosphärische Luft zu den Kohlen; in dem Maße wie letztere verbrennen, rutschen frische Kohlen von oben nach; von dem unteren Teile des Rostes, wo die höchste Glut ist, zieht die Flamme unter dem schrägen, aus feuerfestem Material (Schamottesteinen) hergestellten Gewölbe G aufwärts nach vorn in der Richtung des Pfeiles; aus den höher liegenden noch nicht glühenden Kohlen entwickelt sich Kohlenoxydgas; dasselbe wird durch die hohe Hitze der von unten kommenden Verbrennungsgase so hoch erwärmt, daß es mit der durch die obere Öffnung a einströmenden Luft weiter zu Kohlensäure verbrennt. Die Heizgase treten aus der Feuerung durch die Öffnung b



897. Längsschnitt. 898. Querschnitt

897 u. 898. Einfacher Walzenkessel.

des Gewölbes in den ersten Feuerzug F′ unter dem Kessel und streichen in diesem nach hinten, treten dort bei c in den seitlichen Feuerzug F′′ und ziehen durch diesen an einer Seite des Kessels nach vorn und durch die Verbindung d um die vordere Kesselseite herum durch F′′′ wieder nach hinten, durch den Fuchs in den Schornstein. Die Feuergase streichen also in dreifachem Wege unten und seitlich um den Kessel und geben ihre Wärme hierbei an die Kesselwand ab, welche dieselbe an das Wasser überträgt. Die Feuerkanäle liegen so, daß die Heizgase die Kesselwand nirgends über dem niedrigsten

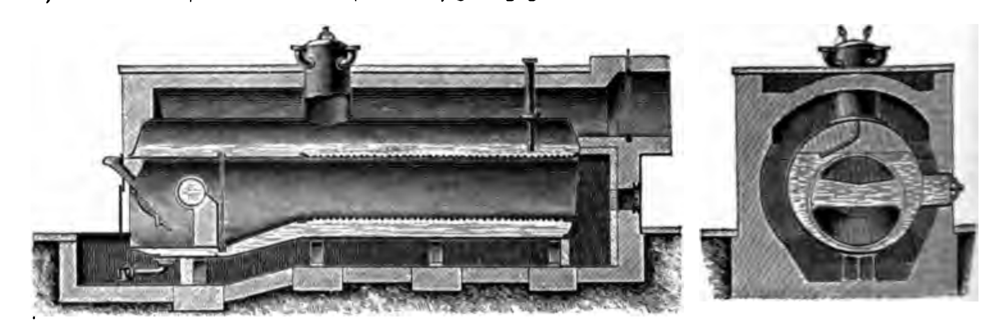


899 u. 900. Flammrohrkessel mit einem Foxschen Wellrohr.

Wasserstande berühren; der Kessel kann sich also an keiner Stelle übermäßig erwärmen, da die Kesselwände alle Wärme sogleich wieder an das Wasser abgeben. Alle Feuerzüge sind mit feuerfestem Schamottematerial ausgefüttert, wie in der Zeichnung durch besondere Schraffierung angedeutet ist. Die Feuerung wird durch die Luftzuführung reguliert und zwar entweder direkt durch Stellung der Klappe K, mit der die Einströmung der Luft unter den Rost mehr oder weniger geöffnet werden kann, oder besser durch Regulierung des Zuges, indem durch einen Rauchschieber S der Querschnitt des Fuchses nach Bedarf mehr oder weniger geöffnet wird. Dieser Schieber kann durch die über Rollen laufende Kette s von vorn durch den Kesselwärter bedient werden. Die einfachen Cylinderkessel nehmen im Verhältnis zu ihrer Leistung viel Raum ein; sie erfordern viel Mauerwerk und sind für größere Anlagen nicht den heutigen Ansprüchen ent-

sprechend; sie werden deshalb auch mehr und mehr von neueren, besseren Konstruktionen zurückgedrängt.

Die einfachste Modifikation des gewöhnlichen Walzenkessels ist der Flammrohrkessel; bei demselben geht der erste Feuerzug durch den Kessel selbst; wenn die Feuerung in diesen Zug gelegt wird, so hat man den Einflammrohrkessel mit Innenfeuerung oder Cornwallkessel, Abb. 899 und 900. Die Heizgase ziehen von dem vorn im Flammrohr liegenden Roste zuerst nach hinten durch das Flammrohr, von dort, ähnlich wie bei dem in der Abb. 897 dargestellten Kessel, durch einen Feuerzug an der einen Seite des Kessels nach vorn und dann an der anderen Seite wieder nach hinten, wo sie in den Fuchs eintreten. Im Längsschnitt sind die Zugrichtungen durch Pfeile markiert; im Querschnitt ist I der erste Zug (Flammrohr), II und III sind die beiden Seitenzüge, welche zwischen der Einmauerung und dem Kessel liegen; unten sind dieselben durch eine Zwischenwand getrennt, die nur vorn eine Öffnung hat, wo die Feuergase von dem linksseitigen nach dem rechtsseitigen Zuge übergehen. Bei dem abgebildeten Kessel besteht das Flammrohr aus gewelltem Blech; solche sogenannte Foxschen Wellrohre, welche, wie auch ganze Kessel, von dem Blechwalzwerk Schulz-Knaudt Akt. Gesellschaft zu Essen a. d. Ruhr angefertigt werden, haben sich in neuerer Zeit in außerordentlich umfangreicher Weise eingeführt, da sie Vorzüge vor den gewöhnlichen Flammrohren aus glattem Blech haben. Sie sind viel widerstandsfähiger gegen das bei solchen Rohren durch hohen

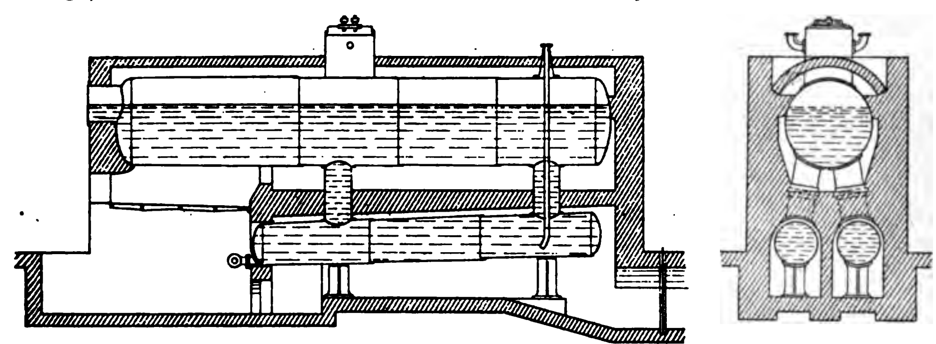


901 u. 902. Flammrohrkessel mit rauchverzehrender Feuerung, System Kuhn.

Kesseldruck zu befürchtende Zusammendrücken; ferner sind sie elastisch, wodurch die schädliche Einwirkung, welche die glatten Rohre durch die beim Erhitzen stattfindende Längsausdehnung durch Druck auf die Kesselböden ausüben, vermieden wird; schließlich geben die gewellten Röhren bei gleicher Größe durch die größere Oberfläche eine stärkere Verdampfung, also höhere Kesselleistung als glatte Flammrohre. Wellrohrkessel werden von Schulz-Knaudt für Drucke bis 12 Atmosphären gebaut.

Bei den Flammrohrkesseln wird die Wärme dadurch gut ausgenutzt, daß der Feuerraum und der erste Feuerkanal, also gerade diejenigen Teile des Kessels, in denen die höchste Hitze herrscht, im Kessel selbst liegen, also ganz vom Kesselwasser umspült werden, während bei Außenfeuerung die erste Hitze der glühenden Kohlen die Erwärmung des Rostes, des Aschenfalls und der Einmauerung der Feuerung bewirkt, also zum Teil verloren geht. Anderseits freilich sind Flammrohrkessel mit Innenfeuerung dadurch, daß der der direkten größten Hitze ausgesetzte Teil des Kesselbleches, nämlich die vordere obere Seite des Flammrohres, die geringste Wasserhöhe über sich hat, eher einer Explosionsgefahr ausgesetzt, da beim Sinken des Wassers unter den zulässigen niedrigsten Stand infolge von Nachlässigkeit des Kesselwärters oder nicht richtigen Anzeigens des Wasserstandsglases (was durch Verstopfung des Wasserstandshahnes vorkommen kann) das Rohr oben von Wasser entblößt werden kann, worauf es glühend wird und die Bedingung zu einer Explosion gegeben ist. Man hat auch Kessel mit zwei nebeneinanderliegenden Flammrohren; haben dieselben Innenfeuerungen, so heißen solche Zweiflammrohrkessel auch Lancashirekessel.

Abb. 901 und 902 stellen einen Flammrohrkessel mit rauchverzehrender Feuerung, System Kuhn (Stuttgart-Berg) dar. Für die Rauchverbrennung wird bei dem „System Kuhn" der schräge Tenbrinkrost, ähnlich wie bei dem Walzenkessel Abb. 897, bei den verschiedensten Kesselsystemen, sowohl als Vorfeuerung oder Unterfeuerung wie als Innenfeuerung angewendet. Die Neigung des Rostes wird der Beschaffenheit des Brennmaterials angepaßt; dabei soll einesteils eine gleichmäßige Zufuhr des Brennmaterials bewirkt und anderenteils das Eindringen kalter Luft über dem Rost verhindert werden. Um sekundäre Luftzuführung über den Rost zur vollständigen Verbrennung der entwickelten Feuergase zu ermöglichen, wird an dem Fülltrichter eine regulierbare Luftklappe angebracht. — Bei Flammrohrkesseln mit Innenfeuerung (Abb. 901 und 902) ist das glatte oder aus Wellblech hergestellte Flammrohr am vorderen Ende derart erweitert, daß dasselbe den geneigten Rost und ein Querrohr als Feuerbrücke aufnehmen kann; das Querrohr ist mit dem Kessel verbunden, also mit Wasser gefüllt; dasselbe bietet eine sehr wirksame Vergrößerung der Heizfläche. Die Feuergase müssen um dasselbe herumstreichen und ziehen dann durch das Flammrohr nach hinten, umstreichen in dem Zwischenraum zwischen Kessel und Einmauerung nach vorn ziehend den unteren Teil des Außenmantels, wobei sie von dem oberen Teile durch gußeiserne Platten, die in gewisser Höhe zwischen Einmauerung und Kesselmantel eingelegt sind, abgesperrt werden, steigen vorn in die Höhe und gehen dann über diesen Abdeckplatten in dem Gewölbezwischenraum über dem Kessel



903 u. 904. Walzenkessel mit zwei Vorwärmern.

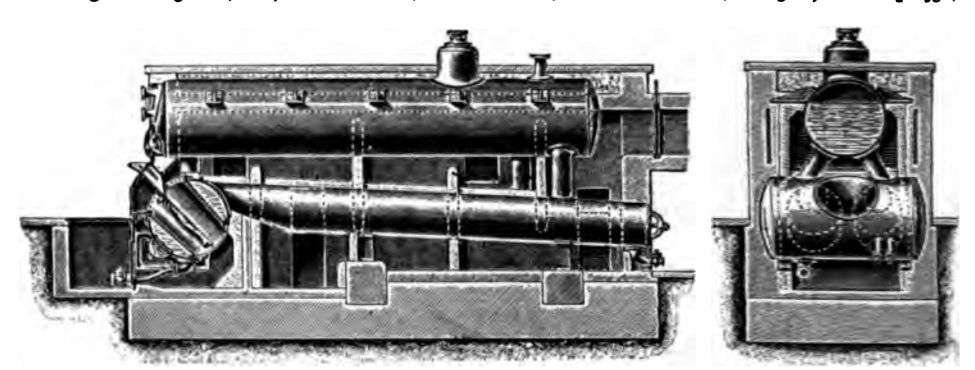
nach hinten in den Fuchs. Der Rost liegt auf der ganzen Länge und Breite vorn ganz frei, so daß die Luft ungehindert zutreten kann, wodurch die Roststäbe sich fortwährend abkühlen, wie bei einem gewöhnlichen Planrost.

Um die Wärme der abziehenden Heizgase im letzten Feuerkanal noch besser auszunutzen, legt man häufig bei Walzenkesseln und auch bei Flammrohrkesseln in denselben in der Längsrichtung einen oder zwei **Vorwärmer**, große schmiedeeiserne Röhren, durch welche das Speisewasser passieren muß, ehe es in den Kessel selbst gelangt; es wird also in den Vorwärmern schon auf eine hohe Temperatur gebracht. Die Vorwärmer können über oder unter dem Hauptkessel liegend angeordnet werden; letztere Anordnung zeigen die Abb. 903 und 904 bei einem Walzenkessel im Längs- und Querschnitt.

Eine ähnliche Konstruktion hat der in den Abb. 905 und 906 dargestellte **Tenbrink-Zirkulationskessel** (von Kuhn, Stuttgart-Berg). Derselbe besteht aus einem Oberkessel mit darunter liegendem Tenbrinkapparat und einem oder zwei an den letzteren angenieteten Unterkesseln, welche mit dem Oberkessel durch Stutzen so verbunden sind, daß sie nach vorne etwas ansteigen, so daß die in demselben sich bildenden Dampfblasen durch den Tenbrinkapparat in den Oberkessel bequem aufsteigen können. Der Unterkessel stellt hier keinen Vorwärmer dar, die Speisung geschieht vielmehr von oben; er bewirkt eine Zirkulation des Wassers im Kessel, so daß dasselbe sich an den Heizflächen vorbei bewegt und hierbei die Wärme derselben aufnimmt, wodurch schädliche große Temperaturunterschiede in den verschiedenen Teilen des Kessels vermieden werden. Die Feuerung ist rings von wasserbespülten Heizflächen umgeben und wirkt also vorteilhaft

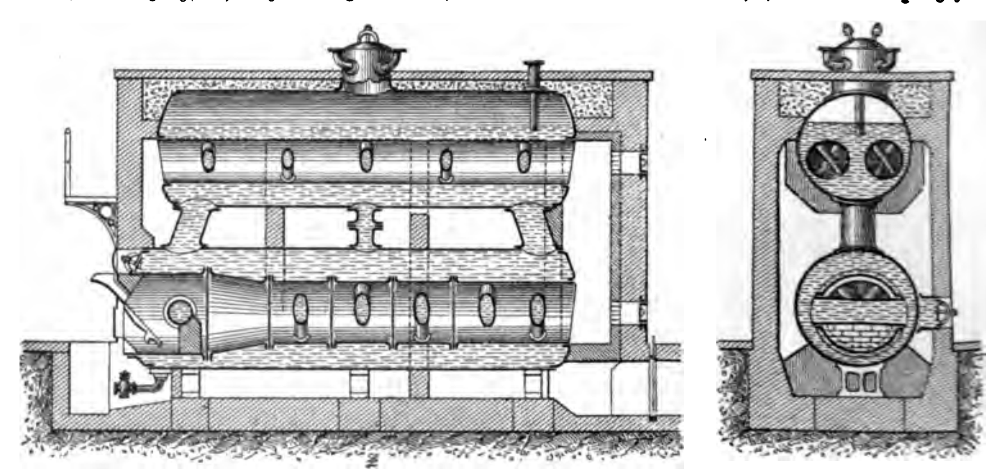
als Innenfeuerung; die Heizgase wenden über dem Tenbrinkapparat nach hinten, ziehen unter dem Oberkessel entlang und hinten nach dem Unterkessel hinab; ist nur ein solcher vorhanden, so streichen sie an diesem entlang nach vorn und seitlich in den Fuchs; bei zwei Unterkesseln sind dieselben durch eine Scheidewand getrennt, und die Feuergase ziehen an dem einen vorbei nach vorn und dann längs dem anderen wieder nach hinten in den Fuchs.

In den gewöhnlichen Flammrohren, wie auch in den Wellrohren ziehen die Heizgase



905 u. 906. Tenbrink-Zirkulationskessel von G. Kuhn in Stuttgart.

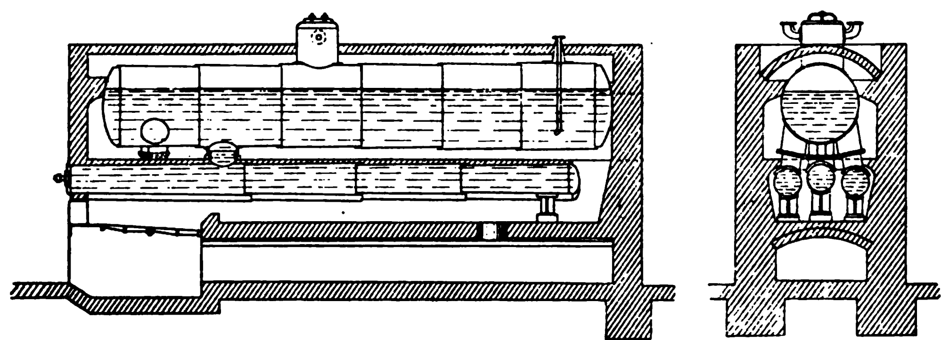
in ziemlich gleichmäßigem Strome parallel von vorn nach hinten; nur die direkt an den Heizflächen vorbeistreichenden Gase geben unmittelbar ihre Wärme an dieselbe ab, während der mittlere heiße Strom nur durch Strahlung und vermittelst der umgebenden Gase auf die Heizwände wirkt. Um den ganzen Strom in direkte Berührung mit wasserbespülten Heizflächen zu bringen und so eine direktere und vorteilhaftere Ausnutzung zu



907 u. 908. Kombinierter Flammrohrkessel mit Gallowayröhren.

erzielen, werden in die Flammröhren Quersieder gesetzt, die nach ihrem Erfinder Gallowayrohre genannt werden; es sind Rohrstutzen, die quer durch das Flammrohr gehen und beiderseits mit dem Kessel dicht verbunden sind. Solche Gallowayröhren hat der kombinierte Flammrohrkessel von G. Kuhn, (Abb. 907 und 908). Derselbe ist aus einem Unterkessel und einem Oberkessel kombiniert, der erstere hat ein Flammrohr, letzterer deren zwei nebeneinanderliegend; die Feuerung ist die schon beschriebene schräge Innenfeuerung. In die Flammrohre sind je fünf abwechselnd kreuzweise schräg zu einander gestellte Quersieder eingesetzt. Die Feuergase werden in ihrem Zuge durch diese aufgehalten und wirbeln durcheinander, so daß sie in wirksamster Weise direkt

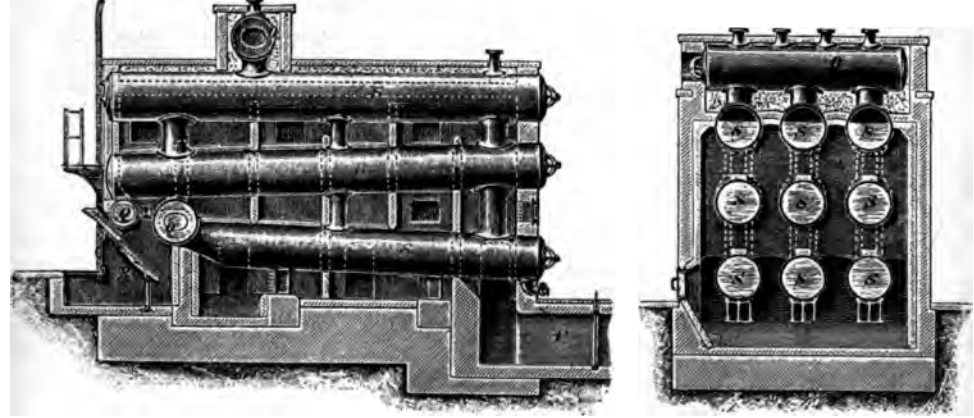
sowohl die Quersieder wie das Flammrohr bestreichen. Aus dem ersten Flammrohre steigen die Heizgase in die Feuerrohre des Oberkessels, strömen in denselben nach vorn und werden durch eine kammerartige Einmauerung des Kessels gezwungen, auf dem Wege nach dem hinten liegenden Fuchs nochmals die Kessel von außen zu bestreichen. Die Ausnutzung der Gase ist auf diese Weise eine sehr vollkommene, so daß dieselben nur mit der zur Erzeugung des Zuges erforderlichen Temperatur entweichen. Ein Nachteil der Gallowayröhren liegt darin, daß der Verbrennungsraum verengt und die freie Entwickelung der Flamme beeinträchtigt wird, auch kann durch zu frühe Ab-



909 u. 910. Sieder- oder Bouilleurkessel.

kühlung der Heizgase, ehe der Verbrennungsprozeß vollständig vollzogen ist, die vollkommene Verbrennung beeinträchtigt werden; schließlich erschweren auch die eingebauten Quersieder die Reinigung des Flammrohres von Flugasche und Ruß.

Ein altes, recht brauchbares Kesselsystem ist der Sieder- oder Bouilleurkessel. Wie die Abb. 909 und 910 zeigen, ist derselbe eine Verbindung eines weiten oberen mit mehreren engeren unteren Cylinderkesseln; letztere heißen Sieder oder Bouilleurs und

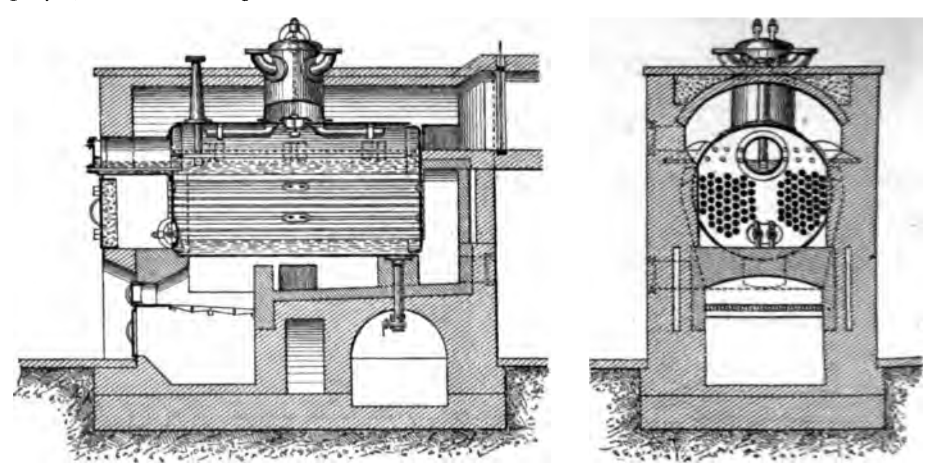


911 u. 912. Batterie- oder Etagenkessel.

sind mit dem oberen Kessel durch mehrere Rohrstutzen verbunden. Die Feuerung befindet sich unter dem Unterkessel; in ihm wird das Wasser zum Sieden gebracht, und der entwickelte Dampf steigt in den Oberkessel; nur letzterer hat einen Dampfraum, während die Sieder ganz mit Wasser gefüllt sind. Man kann auch den Oberkessel noch als Flammrohrkessel ausbilden, wodurch der zu den kombinierten Kesselsystemen gehörige Siederflammrohrkessel entsteht. Die Siederkessel eignen sich gut für hohe Dampfspannung und haben eine höhere Leistung in der Dampferzeugung als die gewöhnlichen Cylinderkessel. Eine eigentümliche Art Siederkessel sind die sogenannten Batteriekessel oder Etagenkessel; dieselben bestehen aus mehreren in Etagen übereinanderliegenden Siedern,

die nach oben miteinander verbunden sind, und einem gemeinschaftlichen Oberkessel; die Abb. 911 und 912 zeigen einen solchen mit neun Siedern, zwei Quersiedern Q und einem Oberkessel O schematisch im Längen- und Querschnitt. Die Heizgase ziehen von dem Rost R — in der Abb. 911 ist eine Tenbrinkfeuerung gezeichnet — zwischen den Quersiedern nach oben und bestreichen dann abwechselnd Ober-, Mittel- und Unterkessel, indem sie durch die Feuerzüge der Einmauerung gezwungen nach hinten und vorn in Windungen nach dem Fuchs F ziehen. Diese Kessel ergeben infolge lebhafter Wasserzirkulation eine gute Verdampfung und eignen sich besonders für größere Anlagen und für hohen Dampfdruck. Die gezeichnete Konstruktion ist von G. Kuhn in Stuttgart Berg. Durch besondere Schraffierung des Mauerwerks im Schnitt ist in beiden Abbildungen feuerfestes Schamottemauerwerk angedeutet.

Bei den Feuerrohrkesseln gehen durch den Wasserraum des Kessels eine große Anzahl enger Röhren, deren Vorderseite in den Feuerraum münden, so daß die Feuergase hindurchstreichen; es ist also gleichsam das Flammrohr der Flammrohrkessel in viele enge Röhren geteilt worden. Hierdurch wird eine größere Heizfläche in einem engen Raum geschaffen und die Abgabe der Wärme aus den Feuergasen an das Kesselwasser wesentlich gefördert, und hierin besteht der Hauptvorteil der Feuerrohrkessel; wegen des größeren Widerstandes in den engen Feuerkanälen ist ein höherer Zug erforderlich.

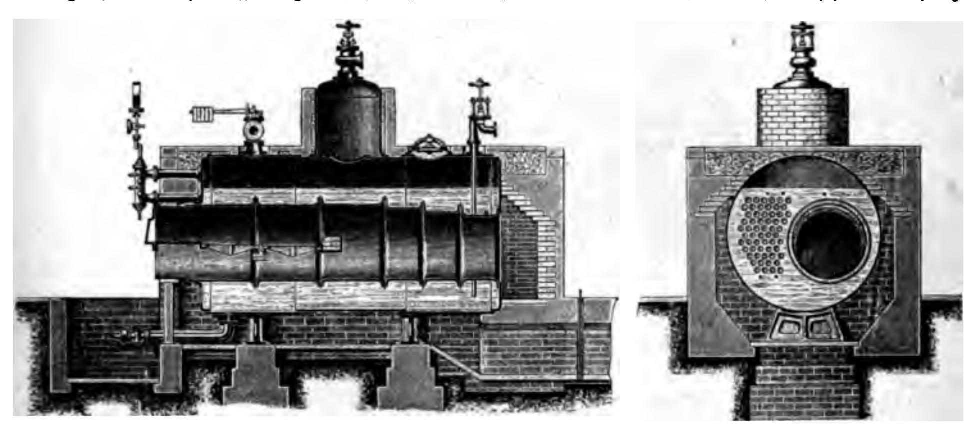


913 u. 914. Feuerröhrenkessel.

Feuerrohrkessel erfordern deshalb einen hohen Schornstein oder künstliche Zugmittel, wozu z. B. bei Lokomotiven das Dampfblaserohr benutzt wird. Einen eingemauerten liegenden Feuerröhrenkessel mit Unterfeuerung zeigen die Abb. 913 u. 914. Die Feuerröhren sind in einen Cylinderkessel eingesetzt; die Heizgase ziehen zuerst unter dem äußeren Mantel desselben nach hinten und von hier durch die Feuerröhren nach vorn, schließlich durch einen gemauerten Feuerkanal über dem Kessel nach hinten zurück in den Fuchs.

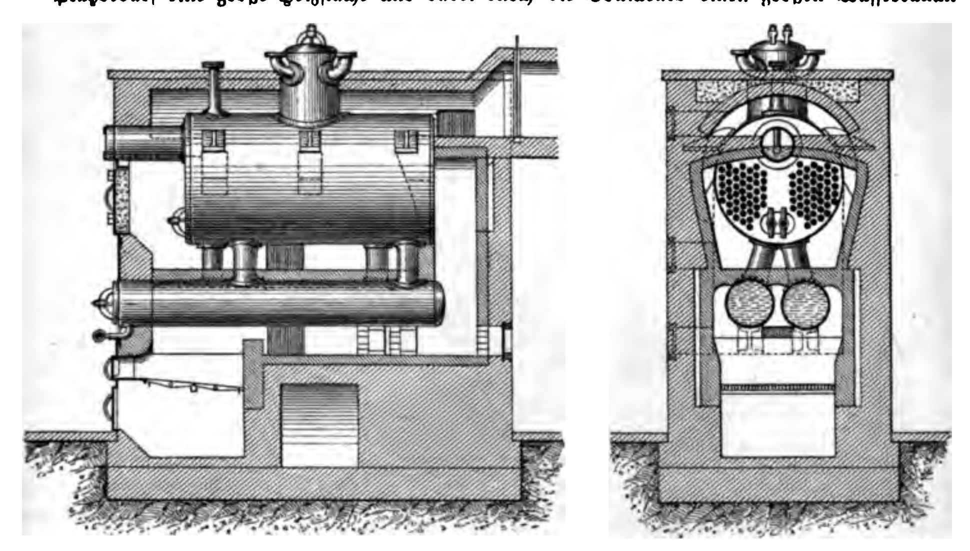
Feuerrohrkessel können auch mit anderen Kesselsystemen kombiniert werden; so ist in den Abb. 915 und 916 ein kombinierter Kessel System Pauksch (H. Pauksch, Akt.-Ges. Landsberg a. d. Warthe) dargestellt; er besteht aus einem Cornwallkessel mit Heizröhren; das Flammrohr ist, wie aus dem Längsschnitt ersichtlich, in besonderer Weise konstruiert; es besteht von der Feuerbrücke ab aus einzelnen kurzen Stücken mit nach außen gebördelten und vernieteten Flanschen; dieselben haben verschiedenen Durchmesser und sind so zusammengenietet, daß ihre untere Linie in einer Flucht liegt, während sich oben sichelförmige Vorsprünge bilden, die am Scheitel am größten sind und nach den Seiten verlaufen. Bei langen Flammrohren wechseln Stücke von größerem und kleinerem Durchmesser ab, so daß die mittlere Weite des Rohres auf die ganze Länge gleich bleibt; bei dem abgebildeten kurzen kombinierten Kessel wird der Durchmesser der einzelnen Schüsse nach hinten kleiner. Durch die Vorsprünge an den einzelnen Schüssen werden in dem Strome der Heizgase Wirbel erzeugt, wodurch fortwährend die inneren heißen Teile desselben gegen die Rohrwand behufs Abgabe ihrer Wärme geführt werden. Durch das Fehlen der sonst diesem Zweck dienenden Einbauten (Galloway-

röhren) wird hierbei der freien Flammenentwickelung kein störendes Hindernis entgegengesetzt. Die Heizgase ziehen von dem Innenrost — in der Zeichnung gewöhnlicher Planrost — zuerst durch das Flammrohr und dann durch die kleinen Feuerröhren nach der Vorderseite, umspülen hierauf beim Rückwärtsziehen nochmals den Kesselmantel und gelangen dann in den Fuchs. Solche Kessel eignen sich wegen ihrer großen Heizfläche besonders für beschränkten Platz.



915 u. 916. Kombinierter Flammrohr- und Heizröhrenkessel, System Pauksch.

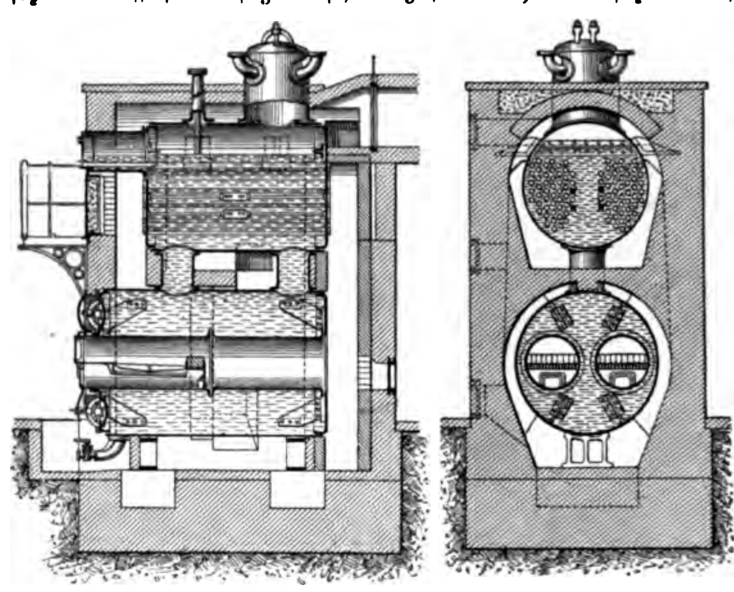
Eine andere Kombination ist der in den Abb. 917 und 918 dargestellte Röhrenkessel mit Siedern. Der Kessel hat gewöhnliche Plantostunterfeuerung; mit dem oberen Feuerröhrenkessel sind durch je zwei angenietete Stutzen die beiden unten liegenden Siederohre verbunden. Die Heizgase streichen unter und seitlich an den beiden Siedern entlang nach hinten, steigen in die Höhe und gehen durch die Heizröhren nach vorn, ziehen dann über den Kessel hinweg wieder nach hinten und entweichen in den Fuchs. Auch diese Konstruktion hat bei geringem Platzbedarf eine große Heizfläche und dabei durch die Bouilleurs einen großen Wasserraum.



917 u. 918. Heizröhrenkessel mit zwei Bouilleurs.

Die Abb. 919 und 920 stellen noch eine andere Kombination eines Flammrohr- und Röhrenkessels dar. Über einem gewöhnlichen, aber verhältnismäßig kurzen Zweiflammrohrkessel mit Innenfeuerungen liegt, durch zwei Stutzen verbunden, ein Röhrenkessel. Die Heizgase steigen am hinteren Ende der Flammrohre in die Höhe, ziehen durch die Heizröhren des Oberkessels nach vorn und umspülen dann nach rückwärts ziehend den Außenmantel desselben, ehe sie in den Fuchs treten. Diese Kessel haben bei geringer Grundfläche eine große Leistungsfähigkeit, dabei aber eine beträchtliche Höhe. Die Verdampfungsfähigkeit und auch die Ausnutzung der Feuergase ist eine hohe.

Ein Übelstand der gewöhnlichen Röhrenkessel, des sogenannten **Lokomotivtypus** (so genannt, weil seit langer Zeit die Lokomotiven allgemein mit solchen ausgerüstet sind), sowie auch der Kombinationen mit solchen liegt bei Verwendung nicht kesselsteinfreien Wassers darin, daß die Reinigung der Röhren von dem ausscheidenden und sich außen an den Röhren festsetzenden Kesselstein lästig und schwierig ist. Durch den Ansatz der Kesselsteinkruste an sämtlichen Röhren wird die Verdampfungsfähigkeit des Kessels und die Ausnutzung des Brennmaterials beeinträchtigt, indem der Kesselstein den Wärmedurchgang vermindert und zwar in recht beträchtlichem Maße; eine 1 mm starke Kesselsteinkruste bietet dem Wärmedurchgang so viel Hindernis wie eine 13 mm dicke Eisenblechplatte. Ein starker Kesselsteinansatz wirkt auch nachteilig auf die Haltbarkeit des Kessels, indem eine gleichmäßige Abkühlung der Platten und Röhren verhindert wird; starker Kesselsteinansatz kann nicht nur bei Feuerröhrenkesseln, sondern auch bei allen anderen Systemen Ursache zu Rissen und Explosionen des Kessels werden.



919 u. 920. Kombinierte Zweiflammrohrkessel mit Innenfeuerung und Feuerröhrenkessel.

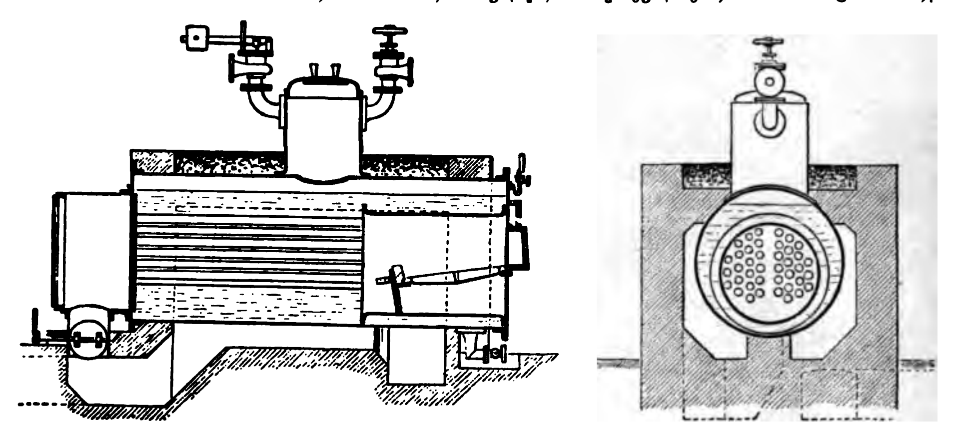
Einen bedeutenden Vorzug haben in Bezug auf die Reinigung der Röhren die Wolfschen Feuerröhrenkessel mit ausziehbarem Röhrensystem, welche sich seit längeren Jahren mit sehr gutem Erfolge eingeführt und die ältere Konstruktion besonders bei Lokomobilen vielfach verdrängt haben. Bei diesem System sind alle Röhren zu einem festen System verbunden und mitsamt der Feuerbuchse aus dem Kessel ausziehbar; zu diesem Zwecke brauchen nur einige Schrauben gelöst zu werden. In Abb. 921 ist eine stationäre Lokomobile mit ausgezogenem Röhrensystem dargestellt: der Arbeiter beseitigt in bequemer Weise den Kesselstein von den äußeren Rohrwänden; die Röhren sind so angeordnet, daß man mit geeignet geformten Meißeln alle Stellen derselben erreichen kann. Das Wiedereinsetzen des Rohrsystems ist ebenfalls sehr einfach zu bewirken. Die Wolfschen Dampfkessel mit ausziehbarem Röhrensystem



921. Feuerröhrenkessel mit Wolfschem ausgezogenen Röhrensystem.

(eingeführt und hergestellt von R. Wolf, Buckau-Magdeburg) werden zum Einmauern oder freistehend mit eisernem Schutzmantel oder auch fahrbar als Lokomobilkessel eingerichtet.

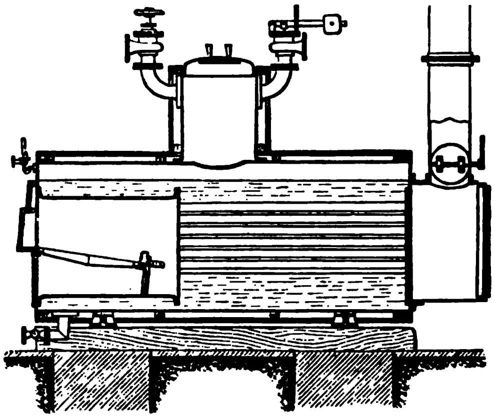
Die Abb. 922 und 923 stellen einen Kessel ersterer Konstruktionsart im Längenschnitt und Querschnitt dar. Wie aus Abb. 922 ersichtlich, liegt die Feuerung vorn im Kessel; es ist also eine Innenfeuerung, womit die früher besprochenen Vorteile für die Heizwirkung verbunden sind; die Feuerröhren sind einerseits in die Wand der Feuerbuchse, am anderen Ende in die Rückwand einer Rauchkammer dicht eingesetzt; die Heizgase ziehen aus der Feuerbuchse



922 u. 923. Eingemauerter Feuerrohrkessel mit ausziehbarem Röhrensystem.

durch die Feuerröhren in die Rauchkammer, wobei sie in vorteilhafter Weise direkt das die Röhren umspülende Kesselwasser verdampfen, dann durch einen an die Rauchkammer angesetzten Rohrstutzen unter und neben dem Kessel entlang nach vorn, und schließlich in den seitlich aufgestellten Schornstein. Durch die Anordnung eines solchen Unterzuges werden die abziehenden Heizgase zur äußeren Erwärmung der unteren und seitlichen Kesselwand nutzbar gemacht, womit eine höhere Ausnutzung des Brennmaterials erreicht und noch eine Verminderung der bei allen Kesseln unvermeidlichen Ausdehnungsdifferenzen durch verschieden hohe Erwärmung bewirkt.

Einen freistehenden, sogenannten stationären Lokomobilkessel zeigt Abb. 924 im Längsschnitt; derselbe ruht auf gußeisernen Tragfüßen und kann fix und fertig betriebsfähig verschickt und aufgestellt werden. Die Abführung der Heizgase kann, wie in der Skizze angedeutet, durch einen direkt auf die Rauchkammer gesetzten Blechschornstein erfolgen, oder, wie bei den eingemauerten Kesseln, durch einen nach unten angesetzten Rauchstutzen in einen besonderen, gemauerten oder eisernen Schornstein. Im letzteren Falle empfiehlt es sich, wie bei der vorigen Anordnung, die Heizgase mittels eines Unterzuges zuvor unter dem Kessel hinweg streichen zu lassen.



924. Freistehender Feuerrohrkessel mit ausziehbarem Röhrensystem und Schutzmantel.

Für viele Betriebe ist es notwendig oder wünschenswert, den Dampferzeuger schnell und bequem transportieren zu können, z. B. um bei Wasserbauten den Betriebsdampf für Pulsometer zu beschaffen, oder als Aushilfe für Dampfanlagen, wenn die stationären Kessel einer größeren Reparatur unterzogen werden u. dgl. Für solche Zwecke sind sogenannte fahrbare Lokomobilkessel der in Abb. 925 abgebildeten Art sehr geeignet. Dieselben ruhen auf einem kräftigen Fahrgestell, sind mit ausziehbarem Röhrensystem und umlegbarem Schornstein versehen. Sie sind mit kompletter Ausrüstung, Armatur und Speisevorrichtung versehen, so daß sie überall sofort angeheizt und in Betrieb gesetzt

werden können, nachdem an den Flansch des seitlichen Dampfventils am Dom Dampfleitung angeschlossen ist.

Die beschriebenen Feuerrohrkessel werden für Dampfspannungen von 6—8 Atmosphären gebaut.

Wasserröhrenkessel. Bei denselben wird der Vorteil einer großen Heizfläche auf umgekehrtem Wege erreicht, wie bei den Feuerröhrenkesseln, indem das Wasser sich in zahlreichen engen Röhren befindet, die von den Heizgasen umspült werden. Wie schon eingangs dargelegt, haben diese Kessel den Vorzug geringerer Explosionsgefahr, dagegen haben sie gegenüber Flammrohr- und Siederkesseln den Nachteil, daß sie nicht so haltbar sind und häufiger Reparaturen bedürfen.

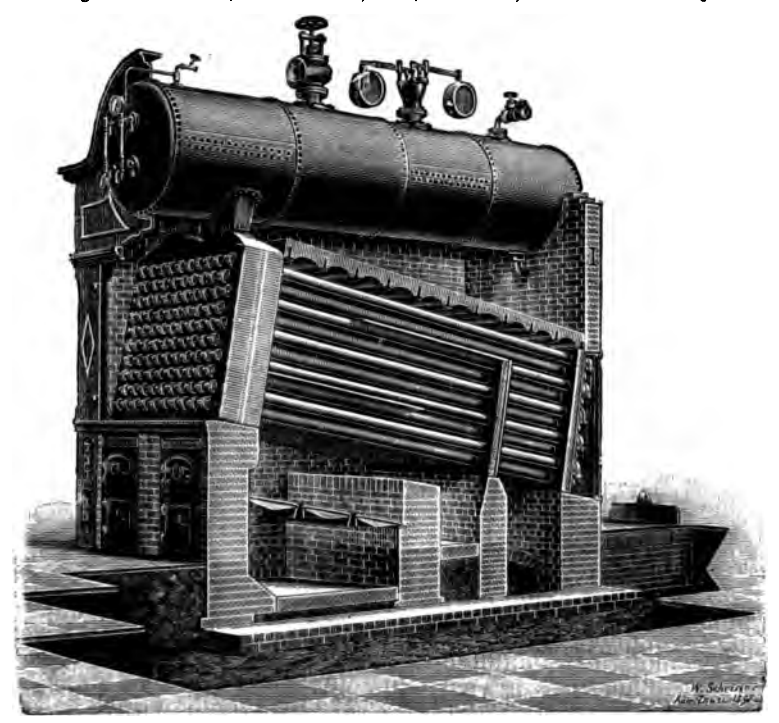


925. Fahrbarer Lokomobilkessel.

Zu den älteren Konstruktionen von Wasserröhrenkesseln gehören der Albansche, der Belleville- und der Rootsche Kessel. Die ersten Wasserrohrkessel von Alban, welche derselbe schon gegen 1840 baute, hatten nahezu horizontal liegende Röhren, die vorn in eine gemeinschaftliche Wasserkammer mündeten, welche mit zwei oberen Dampf- und Wassersammlern verbunden war. Die Wasserzirkulation war bei denselben unvollkommen, da die Einführung des Wassers aus der Wasserkammer in die Röhren von derselben Seite erfolgte, an welcher aus den Röhren das Gemisch von heißem Wasser und Dampf ausströmen mußte. Bei der verbesserten Albanschen Konstruktion war diesem Übelstand einigermaßen dadurch abgeholfen, daß an beiden Enden der Röhren Wasserkammern angeordnet waren, welche mit einem Oberkessel in Verbindung standen; diese Konstruktion ist die Grundlage der späteren besseren Röhrenkessel geworden; der Albansche Kessel hatte aber noch den Fehler, daß die Röhren horizontal lagen; hierdurch fand keine genügende, regelmäßige Wasserzirkulation statt, indem das Gemisch von heißem Wasser und Dampf nach beiden Seiten aus den Röhren entweichen konnte. Später kamen aus dem Auslande die Belleville und die Rootkessel; dieselben hatten keine Wasserkammern; sie bestanden aus einer Anzahl übereinander liegender Röhren, die vorn und hinten miteinander direkt verbunden waren; unten waren sie an einen Speisewassersammler, oben an ein größeres Dampfsammelrohr angeschlossen. Sie hatten den Nachteil, daß der Dampf nicht ungehindert auf direktem Wege in letzteren steigen konnte, wodurch leicht Wasser mit in den Dampfsammler gerissen wurde.

In neuerer Zeit sind sowohl die Albanschen wie die Rootkessel von deutschen Fabriken verbessert worden. Von den Röhrenkesseln gebührt die erste Stelle den Zirkulations-

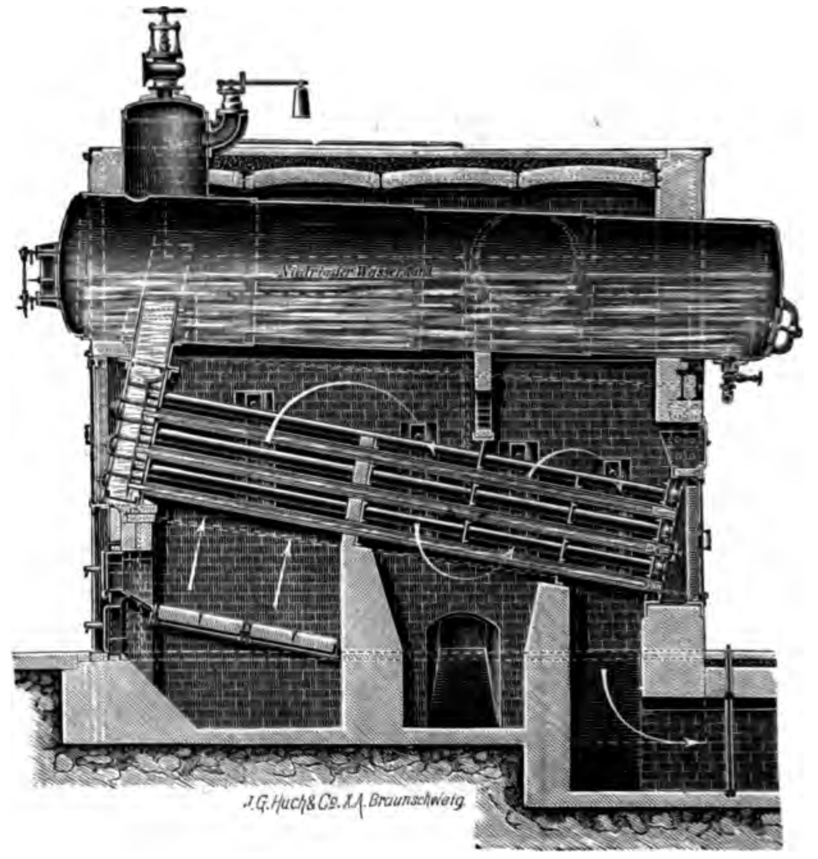
röhrenkesseln, und sie werden in neuerer Zeit fast nur noch als solche von verschiedenen renommierten Dampfkesselfabriken nach verschiedenen Systemen als Spezialität hergestellt. Abb. 926 stellt einen Doppelkammer-Zirkulations-Wasserrohrkessel von Walther & Co. in Kalk bei Köln dar. Derselbe besteht aus einer vorderen geschweißten Wasserkammer, welche durch eine parallel zur Vorder- und Hinterwand liegende Mittelwand in zwei Abteilungen geteilt ist, einem schrägliegenden Röhrenbündel und einem oder zwei walzenförmigen Oberkesseln. Letztere enthalten, wie gewöhnliche Walzenkessel, Wasser und darüber einen Dampfraum. Bei zwei Oberkesseln ist einer an die vordere, der andere an die hintere Abteilung der Wasserkammer durch Stutzen angeschlossen; kommt nur ein Oberkessel zur Anwendung, so ist er durch eine Längsscheidewand in zwei Hälften geteilt, von denen die eine durch Stutzen seitlich mit der vorderen, die andere mit der hinteren Kammerabteilung verbunden ist. Die Röhren sind am hinteren Ende einzeln dicht ver-



926. Doppelkammer-Zirkulations-Wasserrohrkessel von Walther & Co. in Kalk.

schlossen und vorn so in der Wasserkammer befestigt, daß eine vollständig freie Zirkulation mit räumlich getrennten Dampf- und Wasserwegen stattfindet; sie haben nämlich in der hinteren Abteilung der Kammer an der oberen Seite große Löcher, aus denen der Dampf aufsteigt; von der vorderen Abteilung aus geht in jedes Siederohr genau in der Mitte ein an beiden Enden offenes Speiserohr, durch welches das Wasser gezwungen ist, aus der vorderen Abteilung der Kammer unmittelbar in das hintere Ende des Siederohrs zu strömen, ohne daß es in die hintere Abteilung der Kammer auf diesem Wege gelangen kann. Auf diese Weise wird eine lebhafte Wasserzirkulation erreicht; das Wasser wird in den dünnwandigen Siederöhren mit sehr verteilter großer Heizfläche von den Feuergasen rasch erhitzt; Dampf und siedendes Wasser strömen durch die Öffnungen der Röhren in der hinteren Abteilung der Wasserkammer nach oben in den vorderen Teil eines der beiden Oberkessel; die große Verdampfungsoberfläche bewirkt hier ein ruhiges Austreten des Dampfes aus dem Wasser; letzteres durchströmt den ersten Oberkessel von vorn nach hinten, tritt hier durch einen Verbindungsstutzen in den zweiten Oberkessel und gelangt aus diesem vorn in die mit demselben verbundene vordere Abteilung der Kammer, aus

der es durch die an letztere angeschlossenen Speiserohre in den hinteren Teil der einzelnen Siederohre geführt wird. Die ganze Zirkulation ist also eine zwangsläufige, und es muß stets in demselben Maße Wasser in die Siederöhren nachströmen, wie aus denselben Dampf und siedendes Wasser nach vorn und oben entweicht. Auf dem langen Wege, den das Wasser und der Dampf durch die Oberkessel machen, hat ersterer Zeit, sich ruhig auszuscheiden und seine Wasserteilchen fallen zu lassen. Bei Anwendung von nur einem Oberkessel wird die zwangsläufige Wasserzirkulation auf dieselbe Weise bewirkt, indem durch die Scheidewand der Kessel in zwei Teile getrennt wird, welche den beiden Ober-



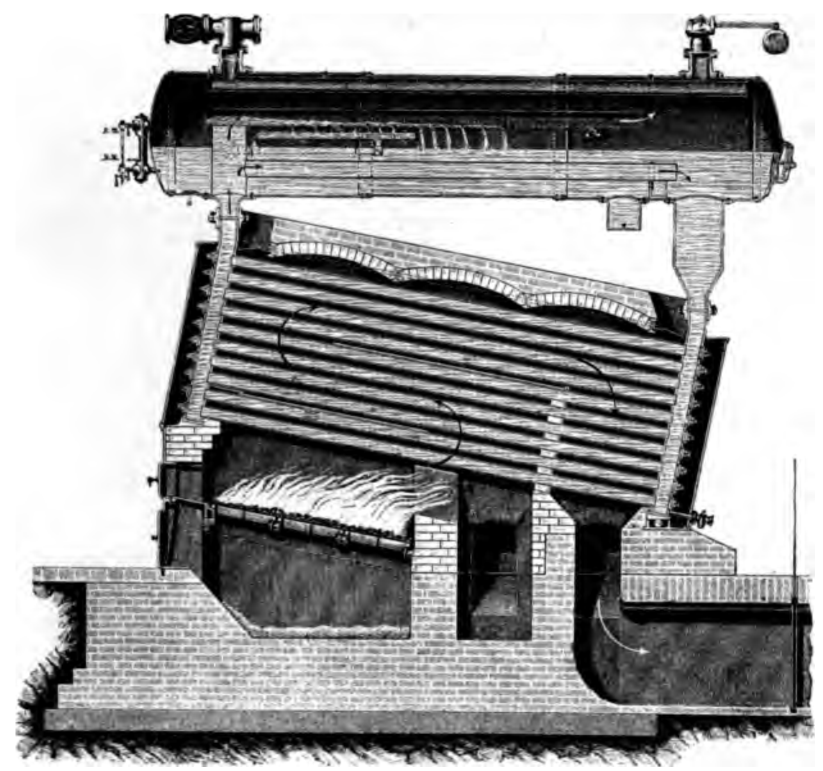
927. Wasserrohr-Zirkulationskessel, System Dürr. (Düsseldorf-Ratinger Röhrenkesselfabrik.)

kesseln entsprechen. Durch die lebhafte Zirkulation wird der sich bildende Schlamm und Kesselstein verhindert, sich in den Röhren oder der Kammer festzusetzen; er wird vielmehr nach oben in den Oberkessel gerissen, wo durch den größeren Querschnitt eine viel geringere Zirkulationsgeschwindigkeit stattfindet, so daß die Schlamm- und Kesselsteinteilchen niedersinken und sich auf dem Boden ablagern können. Von hier können sie durch einen Schlammhahn abgeblasen werden.

Ein anderer Zirkulations-Wasserröhrenkessel von Walther & Co. hat vorn und hinten je eine geschweißte Wasserkammer. Das Röhrensystem liegt, wie bei der vorigen Konstruktion, schräg nach vorn steigend; der Rost liegt unter dem vorderen Ende. Beide Kammern sind mit einem Oberkessel verbunden, und es findet eine kontinuierliche Zirkulation in der Weise statt, daß das in den schräg liegenden Siederöhren erhitzte Wasser mit dem entwickelten Dampfe in die Vorderkammer und aus dieser in den Oberkessel steigt, während das Wasser aus letzterem in die hintere Wasserkammer sinkt. Dieses System hat gegen das vorige gewisse Vorzüge; die Konstruktion ist einfacher und solider, als bei Anwendung der Doppelkammer, Reparaturen an den Siederöhren sind leichter zu bewerkstelligen und besonders die Wasser-

zirkulation ist gesicherter. Bei den einseitig geschlossenen Röhren der vorigen Konstruktion ist es nicht unbedingt ausgeschlossen, daß sich Schlamm und Kesselstein an dem tieferen geschlossenen Ende ablagern und festsetzen und schließlich das innen liegende Speiserohr zusetzen, so daß eine Zirkulation ganz aufhört und ein Durchbrennen des Sioderohres vorkommen kann. Bei starker Inanspruchnahme des Kessels ist es auch möglich, daß sich in den inneren engen Röhren schon Dampf bildet, wodurch die Zirkulation beeinträchtigt wird. Bei je einer Kammer an beiden Enden der Sioderöhren dagegen kann und muß das Wasser und der erzeugte Dampf stets ohne Hindernisse in der bestimmten Weise zirkulieren.

Von ähnlicher Konstruktion, wie die erst beschriebene, ist der Zirkulations-Röhrenkessel, System Dürr, den die Düsseldorf-Ratinger Röhrenkesselfabrik vorm. Dürr & Co. zu Ratingen als Landkessel und Schiffskessel ausführt und den die Abb. 927 im Längsschnitt darstellt. Derselbe hat ebenfalls einen oder zwei Oberkessel und ein direkt über dem Roste im Zuge der Feuergase liegendes, nach vorn ansteigendes Wasserröhrenbündel, welches



928. Steinmüllerkessel.

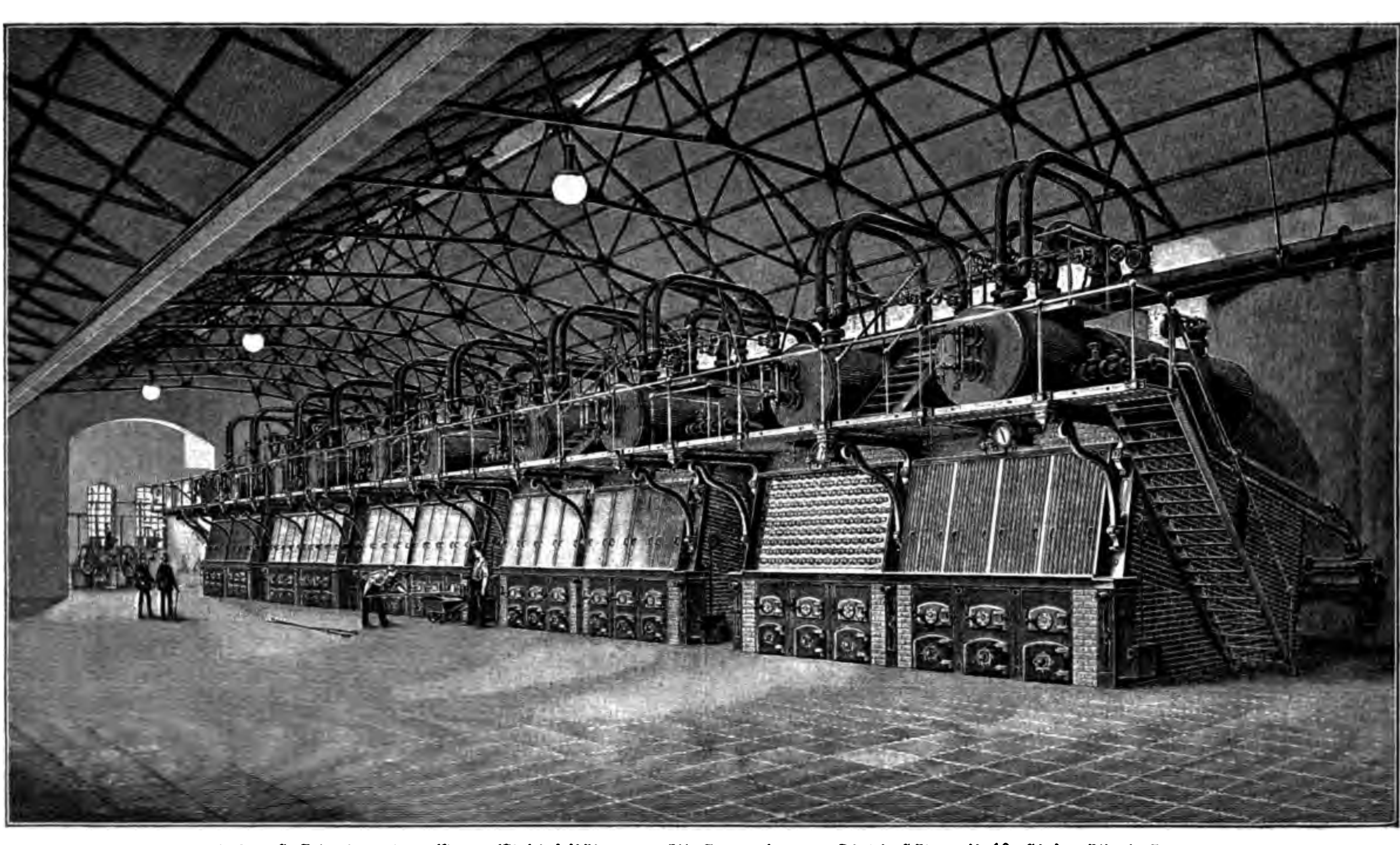
vorn in eine Doppelwasserkammer oder Trennungskammer mündet. Die Wirkungsweise ist mit wenigen Worten dargestellt. Die beiden Oberkessel sind am hinteren Ende miteinander verbunden, und am vorderen Ende ist der eine mit der vorderen Abteilung, der andere mit der hinteren Abteilung der Doppelwasserkammer verbunden, und zwar reicht der erstere Verbindungsstutzen im Oberkessel bis etwas unter den niedrigsten Wasserstand, der Verbindungsstutzen der hinteren Kammerabteilung dagegen in den Dampfraum hinein. Die Sioderöhren liegen mit ihren Enden in der hinteren Kammerwand; in jedem derselben liegt bis nahe zum hinteren Ende ein Füllrohr; diese sitzen mit ihren Köpfen in der Zwischenwand der Kammer, so daß sie mit dem vorderen Teile der Kammer in Verbindung stehen. Das Speisewasser tritt in den einen Oberkessel ein, welcher mit der hinteren Kammerabteilung verbunden ist; aus dieser steigt heißes dampfführendes Wasser auf und erhitzt sofort das frische Wasser auf hohe Temperatur, wodurch der Kesselstein ausgeschieden und von der Strömung nach hinten gespült wird; das Wasser durchzieht

den einen Oberkessel nach hinten, tritt hier in den anderen strömt, durch diesen nach vorn und gelangt hier durch den kurz unter der Oberfläche mündenden Verbindungsstutzen in die vordere Kammerabteilung und zwar ziemlich frei von Kesselstein, der sich inzwischen im Oberkessel abgesetzt hat. Aus der Kammer gelangt es, wie bei der vorigen Konstruktion beschrieben, durch die Füllröhren in die Siederohre, in denen es durch die direkte Umspülung der Feuergase sehr wirksam erhitzt und zum Teil verdampft wird; das Dampfwassergemisch steigt nach vorn in den Oberkessel. Der Dampf macht denselben Weg, wie das Wasser, durch beide Kessel und scheidet hierbei seinen Wassergehalt aus; der Dom sitzt am vorderen Ende des nicht mit der Dampfkammer verbundenen Oberkessels. Bei Ausführung mit einem Oberkessel wird in denselben eine Scheidewand eingesetzt, wodurch dieselbe Zirkulation wie bei zwei Oberkesseln erreicht wird.

Die ausgedehnteste Anwendung von allen Wasserröhrenkesselsystemen hat wohl seit etwa Mitte der achtziger Jahre der Steinmüllerkessel von L. & C. Steinmüller zu Gummersbach gefunden. Derselbe ist in der Konstruktion dem zuletzt beschriebenen ähnlich und besteht aus einem Unterkessel, dem eigentlichen Dampferzeuger mit zwei Wasserkammern und einem oder mehreren darüber liegenden Oberkesseln, welche der Einwirkung der Feuergase nicht ausgesetzt sind (s. Abb. 928). Die Sieberöhren des Unterkessels sind vorn und hinten reihenweise in schmiedeeisernen geschweißten Wasserkammern vereinigt; das Röhrensystem ist stark nach hinten geneigt, so daß über dem Rost, wo die direkte erste Hitze der Feuergase wirkt, die höchste Stelle liegt. Die Heizgase werden so geführt, daß sie, wie die Pfeile andeuten, zuerst den vorderen Teil des Röhrensystems bestreichen und dann hinab zum Fuchs strömen. Der Oberkessel enthält zur Hälfte Wasser und steht mit den beiden Wasserkammern durch weite Stutzen in Verbindung, so daß diese und das Röhrensystem voll Wasser sind. Der sich in den Sieberöhren entwickelnde Dampf steigt, da er leichter ist als Wasser, nach vorn durch die vordere Wasserkammer in den Oberkessel, wobei er siedendes Wasser mit sich fortreißt; in demselben Maße strömt von der hinteren Wasserkammer aus dem Oberkessel Wasser nach in die Röhren. Für die Trennung des aus dem vorderen Stutzen in den Oberkessel steigenden Dampf- und Wassergemisches ist eine besondere Einrichtung angebracht; auf den Verbindungsstutzen ist ein Rohr gesetzt, welches über dem Wasserspiegel ausmündet; nahe über dem Boden ist an dasselbe ein horizontales Rohr angesetzt, durch welches das Wasser nach dem hinteren Verbindungsstutzen abfließt; um außerdem noch eine weitere vollständigere Ausscheidung des Wassers aus dem nach oben strömenden Dampfe zu bewirken, wird der Dampf oberhalb des Wasserspiegels in einen langen viereckigen, geschlossenen Kasten mit durchlöchertem Boden geführt, das seitlich an das Steigrohr angesetzt und am entgegengesetzten Ende offen ist. Beim Durchstreichen durch diesen langen Kasten fällt das mechanisch vom Dampfe mitgerissene Wasser nieder und fließt durch die Löcher im Boden in den Wasserraum des Oberkessels und durch den hinteren Stutzen wieder in das Röhrensystem, während der trockene Dampf aus dem hinteren Ende des Kastens ausströmt. Auf diese Weise wird eine kräftige Zirkulation des gesamten Wasserinhaltes des Kessels bewirkt, der in wenigen Minuten durch die Sieberöhren passiert, und doch eine große ruhige Verdampfungsoberfläche im Oberkessel geschaffen, so daß der Dampf sich vom Wasser trennen kann. — Die Steinmüllerkessel werden auch freistehend ohne Einmauerung mit Innenfeuerung hergestellt mit einer Blechummantelung. Diese Anordnung unterscheidet sich von dem dargestellten eingemauerten Kessel nur durch die Anordnung, während die Wirkungsweise genau die gleiche ist.

Die Steinmüllerkessel sind im letzten Jahrzehnt, besonders bei Elektrizitätswerken, in großer Anzahl zur Verwendung gekommen; die Abb. 929 zeigt z. B. die mit zehn solchen eingemauerten Kesseln ausgerüstete Kesselanlage der Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke der Stadt Köln.

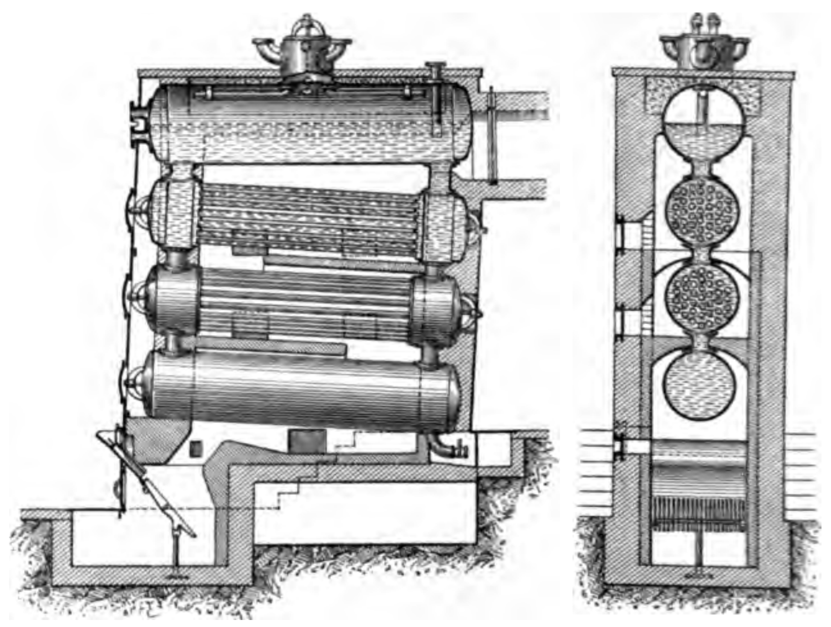
Der Steinmüllerkessel und die vorher beschriebenen, sowie auch andere Zirkulationsröhrenkessel gehören schon nicht mehr zu den Kleinwasserraumkesseln oder reinen Röhrenkesseln; es sind, da sie Oberkessel mit einem größeren Dampf- und Wasserraum besitzen, Kombinationen von Großwasserraum- und Röhrenkesseln; durch die Wasser- und Dampf-



929. Kesselanlage der Gas-, Elektrizitäts- und Wasserwerke der Stadt Köln mit 10 Steinmüllerkesseln.

reserve besitzen sie, besonders wenn sie mit wirksamen Einrichtungen zur Produzierung trockenen Dampfes versehen sind, bis zu einem gewissen Maße auch diesen Vorzug der Großwasserraumkessel. Zu unterscheiden ist, ob der Oberkessel von den Feuergasen bestrichen wird, oder nicht; wenn es der Fall ist, dann können sie nicht mehr zu den explosionssicheren Kesseln zählen; sie teilen vielmehr die Explosionsgefahr mit den gewöhnlichen Großwasserraumkesseln; wenn aber, wie bei den beschriebenen Konstruktionen von Walther und von Steinmüller, die Oberkessel ganz über den Feuerzügen, also außerhalb der Einwirkung der Feuergase liegen, dann gehen freilich einige Quadratmeter Heizfläche verloren, aber es ist für dieselbe eine eigentliche Explosionsgefahr so gut wie ausgeschlossen; es kann höchstens einmal ein Wasserrohr platzen, was keine großen Zerstörungen bewirken kann und verhältnismäßig leicht wieder zu reparieren ist.

Der kombinierte Wasserrohrkessel, System Kuhn (Abb. 930 und 931) besteht aus einem Oberkessel, einem Unterkessel und zwei dazwischen liegenden Röhrenkesseln; jeder ist an beiden Enden mit dem über oder unter ihm liegenden Kessel,



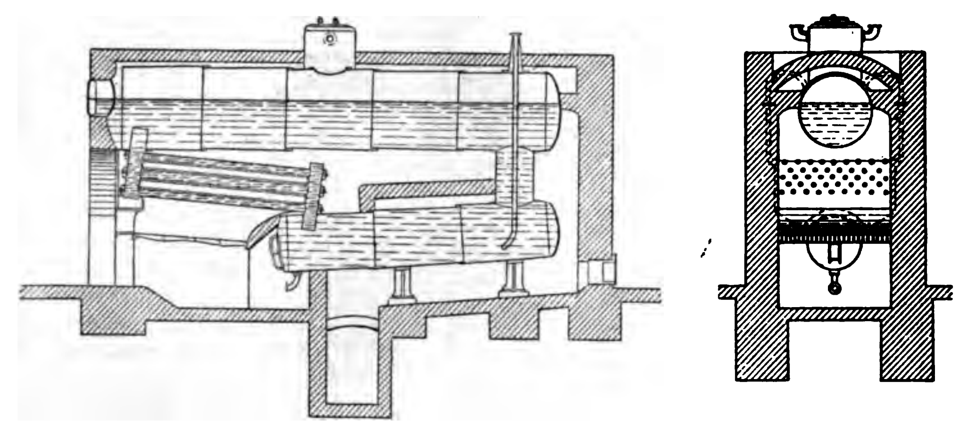
930 u. 931. Kombinierter Wasserrohrkessel, System Kuhn.

bezw. die mittleren nach oben und unten durch angenietete Stutzen verbunden; auf dem Oberkessel befindet sich der Dampfdom. Die Röhrenbündel der beiden mittleren Röhrenkessel münden vorn und hinten in cylindrische Wasserkammern. Die Speisewasserzuführung geschieht in den Oberkessel, und da die drei unteren Kessel geneigt liegen, so findet in ähnlicher Weise wie bei den früher beschriebenen Konstruktionen eine Wasserzirkulation statt, indem das Wasser durch die hinteren Stutzen niedersinkt und das heiße, mit Dampfblasen vermischte Wasser schräg nach vorn durch die vorderen Stutzen in den Oberkessel steigt, wo sich der Dampf von dem Wasser trennt. Die Heizgase umziehen, durch zungenförmige Schamotteeinbauten gezwungen, die Kessel in schlangenartigen Windungen und gelangen oben in den Fuchs.

Zu den kombinierten Wasserrohrkesseln gehört noch der in den Abb. 932 und 933 im Längs- und Querschnitt dargestellte Zirkulationsdampfkessel, System Mac Nicol. Derselbe ist kombiniert aus zwei Cylinderkesseln und einem Wasserröhrenbündel; letzteres liegt direkt über dem Rost und besitzt eine hohe Verdampfungsfähigkeit; hiermit ist durch die beiden Cylinderkessel ein großer Wasserraum und eine große Dampfabgabefläche verbunden. Die starke Verdampfung in den nach vorn etwas ansteigenden Wasserröhren

und das Aufsteigen des mit Wasser gemischten Dampfes nach vorn in den Oberkessel bringt eine lebhafte Wasserzirkulation im Ober- und Unterkessel hervor, wodurch eine fortwährende wirksame Abkühlung der von den Feuergasen bestrichenen Cylinder- und Röhrenflächen stattfindet.

Stehende Dampfkessel. Dieselben werden hauptsächlich für kleine Leistungen, für Dampfmaschinenbetrieb im Kleingewerbe, in kleineren und mittleren mechanischen Werkstätten u. s. w. angewendet, weil sie weniger Raum einnehmen, als horizontale Kessel. Bei vertikalen Kesseln ist eine gute Ausnutzung der Wärme der Feuergase schwieriger, als bei horizontalen Kesseln, da die Gase schnell auf möglichst direktem Wege nach oben in den Schornstein zu ziehen bestrebt sind. Man kann dem indessen durch entsprechende Führung der Gase und durch Einbauten in den Weg derselben entgegenwirken. Einen Nachteil haben alle vertikalen Kessel in der geringen freien dampfabgebenden Wasserfläche im Verhältnis zum Wasserinhalt. Hierdurch wird die Dampfbildung erschwert, und durch die stark bewegte Wasseroberfläche entsteht leicht nasser Dampf. Die stehenden Kessel werden meist mit Innenfeuerung eingerichtet; der Rost liegt unten mitten in einer Feuerbüchse, die ringsherum und oben von Wasser umgeben ist; von derselben geht nach oben durch den Kessel hindurch der Abzug der Feuergase. Einen solchen Kessel einfachster Art



932 u. 933. Zirkulationsdampfkessel, System Max Nicol.

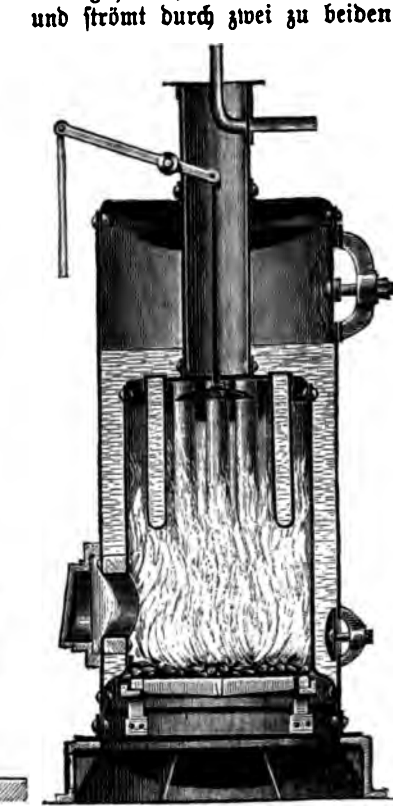
zeigt Abb. 934. Die Feuerbüchse ist ganz geschweißt, ohne Nietverbindungen; in dieselbe sind, in derselben Weise wie früher bei den Gallowaykesseln besprochen, eine Anzahl Quersieder eingeschweißt, welche von den vom Rost aufsteigenden Feuergasen umspült werden, wodurch nicht nur die Heizfläche vergrößert wird, sondern hauptsächlich die Feuergase in ihrem direkten Aufsteigen nach dem Schornstein behindert werden und ihnen Gelegenheit gegeben wird, ihre Wärme an die wasserbespülten Flächen abzugeben.

Abb. 935 zeigt noch einen Fieldschen Röhrenkessel; in den Feuerraum hinein sind von dem Deckel der Feuerbüchse her eine Anzahl unten geschlossener, oben offener, also mit Wasser gefüllter Röhren eingehängt, die der Wirkung der direkten Hitze der Feuergase ausgesetzt sind, wodurch eine lebhafte Dampfbildung erzielt wird. Bei schlamm- oder kesselsteinhaltigem Wasser hat die Anordnung solcher geschlossener Röhren, wie schon bei früherer Gelegenheit bemerkt, den Übelstand, daß sich am Boden Schlamm ablagert oder Kesselstein ansetzt, wodurch die Wärmeabgabefähigkeit der Rohrwand mit der Zeit sehr beeinträchtigt wird, und wenn die Ablagerungen stark werden und nicht rechtzeitig an die Reinigung gedacht wird, zum Glühendwerden und zu Rissen Veranlassung werden kann.

Dampfkessel mit Kohlenstaubfeuerung. In den letzten Jahren sind eine ganze Reihe verschiedener Erfindungen und Konstruktionen veröffentlicht worden, welche die rationelle Verwendung minderwertiger Staubkohle bezwecken. Mehrere derselben haben praktischen Erfolg gehabt, während andere wieder bald nach ihrem Erscheinen ver-

schwunden sind. Die meisten Konstruktionen haben das Gemeinsame und von den übrigen Feuerungen Abweichende, daß das Material nicht auf einem Rost zur Verbrennung gebracht wird, sondern fein verteilt, staubförmig frei in der Luft verbrennt, wie Gas oder zerstäubtes Petroleum. Eine dieser Konstruktionen, welche sich bereits praktisch bewährt hat, sei hier besprochen, der Kohlenstaubfeuerungsapparat, Patent Friedeberg. Abb. 936 ist eine schematische Darstellung der Konstruktion. Das Brennmaterial, Grus und Staub von Stein- und Braunkohlen, wird vor der Verwendung gleichmäßig fein gemahlen; zum Betriebe der Einrichtung dient Druckluft von 50—60 mm Wassersäule Pressung, welche durch einen Ventilator erzeugt wird. Dieselbe wird dem Apparat durch das Rohr L zugeführt; sie teilt sich, wie die Pfeile anzeigen, in zwei Ströme; einer geht nach oben in das Rohr l, mit Drosselklappe k, und strömt durch zwei zu beiden Seiten des Kohlentrichters a befindliche Düsen d d_1 nach unten in den mit Kohlenstaub gefüllten Fuß f des Trichters T; er wirbelt hier den Kohlenstaub auf und führt ihn mit sich durch das Rohr c und das Steigrohr g in den an die Vorderwand angesetzten Stutzen h und weiter durch den ringförmigen Kanal zwischen diesem und dem Schamottekegel K in die Feuerung F. In dem Maße, wie durch den Luftstrom aus dem Fuße des Kohlentrichters der Kohlenstaub aufgewirbelt und fortgeführt wird, sinkt der im oberen Trichter befindliche Kohlenstaub nieder. Der andere Zweig des Luftstromes geht direkt durch das Hauptrohr m mit der Drosselklappe i nach dem Stutzen h, trifft bei dem Schamottekegel mit dem Kohlenstaub-Luftgemisch zusammen und gelangt mit diesem vereint um den Schamottekegel herum in die Feuerung. Durch die Drosselklappen ist die Stärke des Kohlenstromes und auch der besonders zugeführten Luft in weiten Grenzen regulierbar; die ganze Regulierung des Feuers geschieht also durch Einstellen dieser beiden Drosselklappen. Der Feuerungsapparat hat keine bewegten Teile und ist deshalb keiner Abnutzung unterworfen. Die Feuerung selbst besteht aus einem mit Schamottesteinen ausgefütterten Raum; in demselben wird zur Inbetriebsetzung zuerst auf der Sohle aus Holz und Kohlen ein Feuer angefacht; dann kann der eingeblasene Kohlenstaub leicht entzündet werden, und das Feuer unterhält sich weiter selbstthätig. Die Ausnutzung des Brennmaterials ist eine vorteilhafte; es kann eine fast rauch- und rußlose Verbrennung erzielt werden. Ein Übelstand besteht

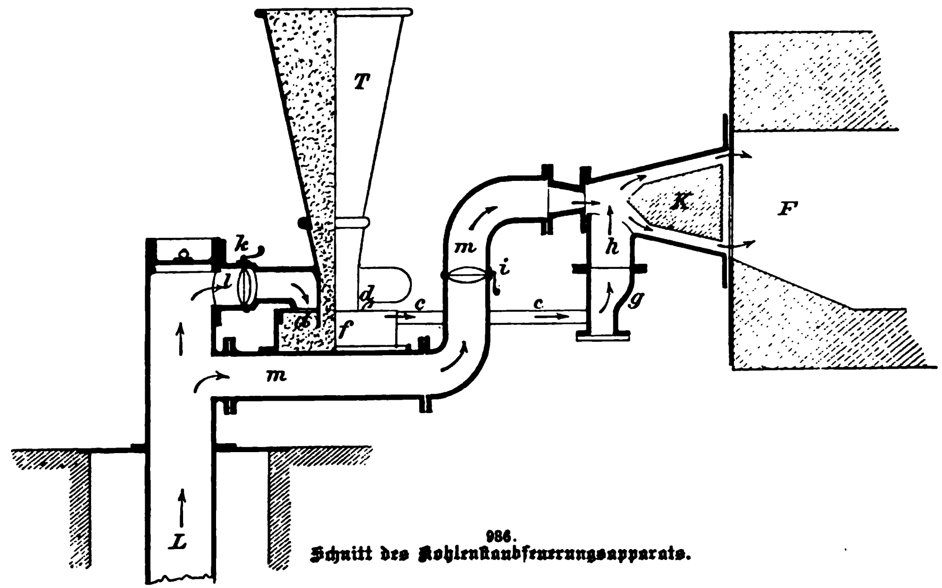
934. Stehender Kessel mit Quersiedern von Menck & Hambrock in Altona.



935. Stehender Fieldscher Röhrenkessel.

darin, daß das gesamte Kohlenmaterial vorher gemahlen werden muß, was für kleinere Anlagen immerhin lästig ist; ferner ist die Inbetriebsetzung davon abhängig, daß der Ventilator für die Erzeugung der Druckluft arbeitet; wo ununterbrochen Kessel und Maschine in Thätigkeit sind, macht dies keine Umstände; wo aber jeden Abend der Betrieb der Kessel und Maschinen unterbrochen wird, so daß morgens keine Kraft zum Betriebe des Ventilators disponibel ist, ehe der Kessel Dampf hat, und die Betriebsmaschine in Gang gesetzt werden kann, da muß diesem Umstande durch einen Vorratsbehälter mit gepreßter Luft abgeholfen werden. Zum Füllen der Trichter dienen besondere Kasten oder Wagen, aus denen der Kohlenstaub unter Verschluß und ohne Staubentwickelung in die Trichter übergefüllt wird. Der beschriebene Kohlenstaubfeuerungs-Apparat läßt sich an den meisten Damfkesselsystemen, sowohl bei Innenfeuerung, wie Unterfeuerung oder Vorfeuerung anbringen; Abb. 937 zeigt seine Anwendung bei einem Kessel mit Unterfeuerung.

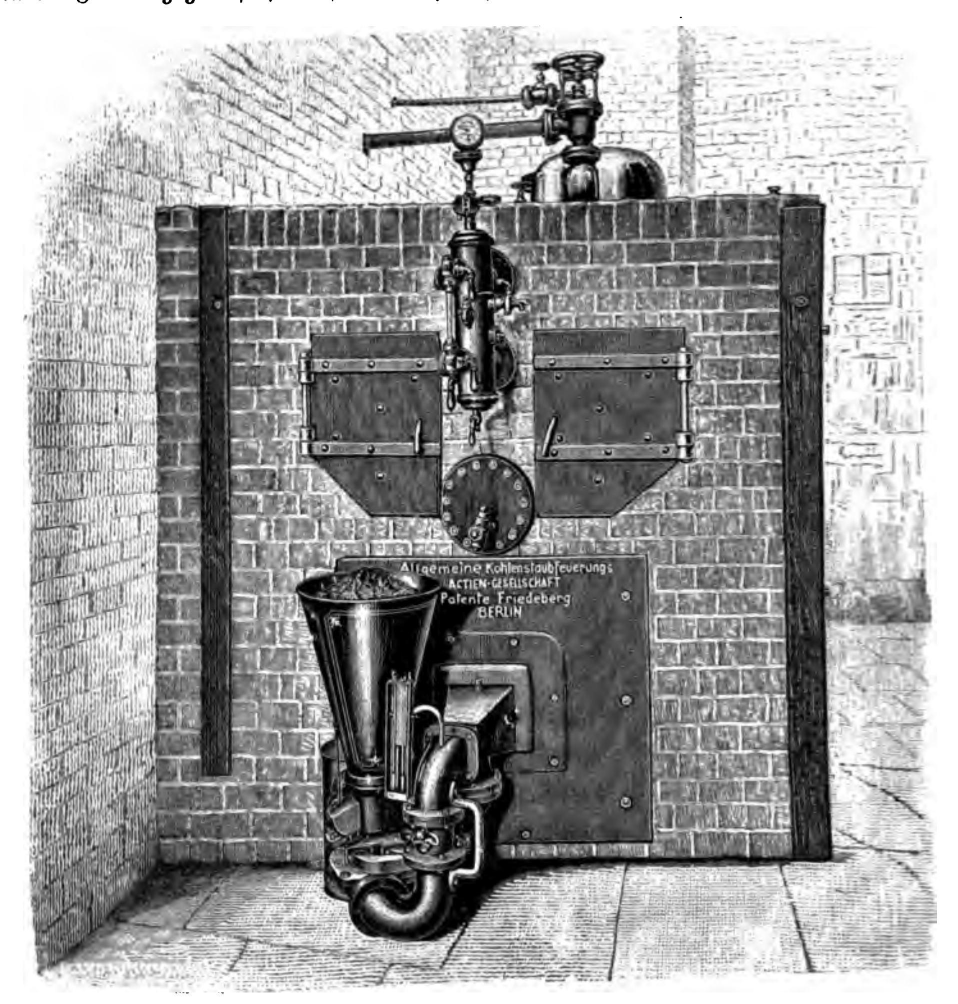
Verwertung geringwertiger Brennmaterialien. Es gibt eine Reihe von sehr billigen, aber minderwertigen Brennmaterialien, welche wegen hohen Aschengehaltes und schlechter Brennbarkeit bei dem gewöhnlichen Zuge in Dampfkesseln nur mangelhaft



986.
Schnitt des Kohlenstaubfeuerungsapparats.

brennen und deshalb in den gewöhnlichen Feuerungen schwer zu verwenden sind. Hierzu gehören die schlechteren Steinkohlenarten und besonders auch Kohlenstaub und Kohlengrus, welche bei den Kohlenaufbereitungsanlagen, den Kokereien und Gasanstalten als sehr geringwertige Nebenprodukte gewonnen und in manchen Fällen geradezu als lästiger, wertloser Abfall betrachtet werden. Die dichte Lagerung dieser Brennstoffe hindert bei dem gewöhnlichen Kesselzuge den erforderlichen Luftzutritt zur Verbrennung. Solche Brennmaterialien können durch die in neuerer Zeit vielfach mit gutem Erfolg eingeführten Feuerungen mit Unterwindgebläse vorteilhaft ausgenutzt werden. Dieselben können bei den meisten Kessel- sowie Rostkonstruktionen angewendet werden; sie beruhen einfach darauf, daß in den geschlossenen Raum unter dem Rost Luft mit einer gewissen Pressung eingeblasen wird, welche durch den Rost und die hoch- oder dichtgelagerten Brennmaterialien in genügender Menge durchdringt und deren Verbrennung bewirkt. Für diesen Zweck kommen vorzugsweise wegen ihrer Einfachheit und hohen Leistung die Körtingschen Dampfstrahlgebläse in Betracht. Über Strahlgebläse ist schon früher (im ersten Teile dieses Bandes) Näheres gesagt worden. Abb. 938 stellt einen Flammrohr-(Cornwall-)Kessel mit einem Treppenrost, welche zur Verwendung minderwertiger Kohlen und Abfall-Brennstoffe besonders geeignet sind, in Verbindung mit einem Körtingschen Dampfstrahl-Unterwindgebläse dar. Der Raum vor dem schrägen

Roste ist zwischen den Seitenwänden durch eine Platte V dicht verschlossen; davor steht das Dampfstrahlgebläse U; von oben wird bei L die Luft angesaugt, während durch das kleine Rohr der Betriebsdampf zugeführt wird. Die eingesaugte Luft wird durch einen Kanal bei A unter den Rost geblasen, tritt durch den letzteren zu dem Brennstoff und entfacht das Feuer. Häufig wird ein Teil der eingeblasenen Luft als sogenannter Oberwind oder sekundäre Verbrennungsluft durch seitliche Kanäle E O oberhalb des Rostes in die Feuerung geblasen, um so die noch nicht vollkommen verbrannten, Kohlenoxydgas



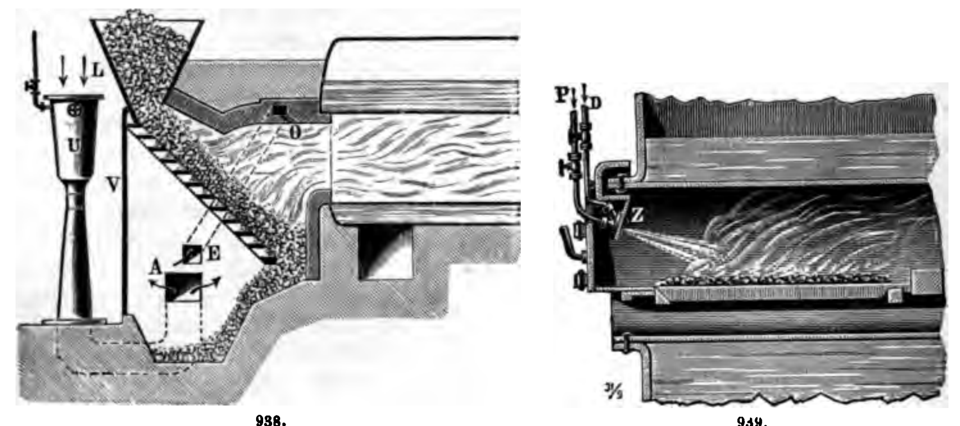
937. Kohlenstaub-Feuerungsapparat an einem Kessel mit Unterfeuerung.

enthaltenden Heizgase besser zu verbrennen. Zur Inbetriebsetzung des Unterwindgebläses genügt das Öffnen des Dampfventils, und durch entsprechende Stellung desselben kann die eingeblasene Luftmenge und damit die Leistung der Feuerung auf einfachste Weise reguliert werden. Die geringe Menge des mit der Luft eingeblasenen Wasserdampfes beeinträchtigt die Heizwirkung nicht; der Dampf wird in der glühenden Kohle in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt und die hierzu verwendete Wärme wird vollständig durch die gleich darauf folgende Wiederverbrennung zurückgewonnen. Solche Unterwindgebläse bieten auch ein einfaches Mittel, die Leistungsfähigkeit eines Kessels zu erhöhen, wenn derselbe wegen Vergrößerung des Betriebes nicht mehr ausreicht, vorausgesetzt, daß die übrige Konstruktion des Kessels eine erhöhte Verdampfung zuläßt. Auch

um die Dampfentwickelung plötzlich im Bedarfsfalle zu erhöhen, den Kessel zu „forcieren" (was allerdings für diesen selbst nie vorteilhaft ist), werden Unterwindgebläse verwendet. Die Möglichkeit der Vergrößerung der Leistung beruht darauf, daß durch die lebhaftere Luftzuführung durch den Rost eine größere Menge Kohlen verbrannt werden können; da die Luftverdünnung in den Rauchkanälen hierbei nicht größer wird, wie dies bei Erhöhung des Schornsteinzuges der Fall sein würde, so wird auch nicht mehr schädliche Luft durch die Undichtigkeiten der Feuerzüge eingesaugt.

Die Verbesserung des Zuges zu enger oder zu niedriger, schlecht ziehender Schornsteine durch Schornstein-Ventilatoren ist bereits früher besprochen worden.

Dampfkesselfeuerungen für flüssige Brennstoffe. Zum Schluß sei noch kurz eine Einrichtung für Dampfkessel zur Verbrennung flüssiger Brennstoffe beschrieben. Abb. 939 zeigt eine solche für Petroleumverbrennung bei einem Cornwallkessel; das flüssige Brennmaterial, Petroleum oder Masut oder Teer wird in einem Dampfstrahlzerstäuber vermittelst eines Dampfstrahles oder eines aus Luft und Dampf gemischten Strahles beim Austritt aus dem Zuflußrohre fein verteilt und zerstäubt in die Feuerung geblasen. Bei schweren, dickflüssigen Stoffen, wie Teer, Masut u. dergl. ist die Verwendung eines reinen Dampfstrahles zweckmäßig, weil er eine größere Kraft hat, als

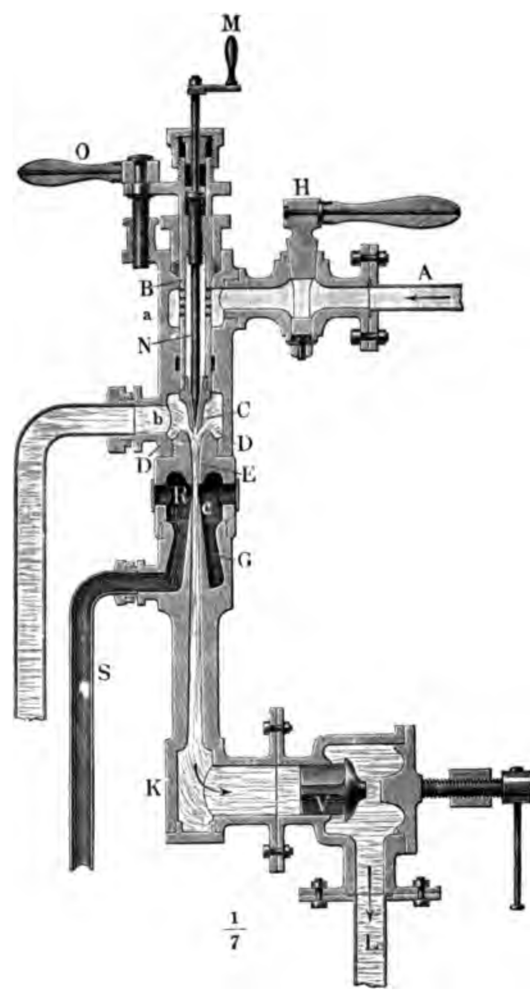


938. Unterwindgebläse an einem Flammrohrkessel mit Treppenrost. 939. Petroleumfeuerung bei einem Dampfkessel.

wenn er vorher Luft mit ansaugt und auch durch seine höhere Temperatur zur Verdünnung des Brennmaterials beiträgt. Bei dünnen Flüssigkeiten, wie Petroleum, kann statt des Dampfes auch Druckluft verwendet werden, wo solche zur Verfügung steht. In der Abbildung ist P das Zuflußrohr des Brennmaterials, D die Dampfzuleitung; der aus der Dampfdüse bei Z schräge an der Mündung des Zuflußrohres ausströmende Dampfstrahl reißt das aus letzterer ausfließende Brennmaterial mit fort, wobei dasselbe fein verteilt wird und mit der von unten zugeführten Verbrennungsluft im Flammrohr frei verbrennt; die Luftzuführung wird zweckmäßig durch einen Schieber so reguliert, daß gerade nur die zur vollständigen Verbrennung notwendige Luft zuströmt. Bei Verwendung von Petroleum wird zur Inbetriebsetzung zuerst auf dem Roste ein kleines Feuer mit Holz angezündet, um die Verbrennung einzuleiten; dann verbrennt es ohne besondere Unterfeuerung von selbst weiter; Teer z. B. wird dagegen meist als Zugabe zu festen Brennmaterialien benutzt und auf diese geblasen, da derselbe bei seiner Dickflüssigkeit allein ein sicheres, selbständiges Brennen wie Rohpetroleum oder Petroleumrückstände (Masut) nicht gestattet.

In Rußland hat sich die Feuerungsmethode mit Naphtharückständen, seitdem die Konstruktion von Apparaten zur rationellen Verbrennung derselben vollständig gelungen ist, über das ganze Reich verbreitet; hierdurch ist nicht nur die riesige russische Petroleumindustrie auf eine andere Basis gestellt worden, indem die bedeutenden Mengen der früher wertlosen Rückstände aus der Naphthadestillation sehr vorteilhaft verwertet werden,

sondern für die ganze russische Industrie überhaupt ist die Einführung der Naphthafeuerung von größter Bedeutung geworden. Im ganzen Moskauer Fabrikbezirk hat bereits seit mehreren Jahren die Verwendung der Naphtharückstände die Heizung der Dampfkessel mit Holz oder Kohlen zum großen Teile verdrängt und bei den großen Fortschritten in den Transporteinrichtungen für die Naphthaprodukte verbreitet sich die Naphthaheizung immer mehr. In Nordamerika wird dagegen, trotz seiner gewaltigen Erdöllager, die Petroleumheizung zur Kesselfeuerung an Stelle der Kohlen noch verhältnismäßig wenig angewendet, jedenfalls weil dort auch die Kohlen in riesigen Lagern vorhanden und ziemlich billig sind.



940. Giffards Injektor.

Die großen Vorzüge der Heizung mit flüssigen Brennstoffen liegen auf der Hand. Abgesehen von dem örtlichen Preisverhältnis zwischen Naphtha oder Masut und Steinkohlen, welches ja allerdings der wichtigste Faktor und in erster Linie maßgebend für die Verwendung des einen oder anderen Brennstoffes ist, bestehen dieselben hauptsächlich in der großen Bequemlichkeit der Bedienung und der Sauberkeit des Betriebes. Die ganze Bedienung der Feuerung besteht in dem Einstellen des Dampfregulierventiles, wozu noch die Instandhaltung und regelmäßige Reinigung der Ölausflußdüse kommt; geübte Heizer, von deren Geschicklichkeit und Eifer stets bei den Kohlenfeuerungen in hohem Maße eine gute Kohlenökonomie abhängt, sind hierdurch entbehrlich; man braucht keine eigentlichen Heizer im gewöhnlichen Sinne des Wortes mehr, sondern nur Kesselwärter; ein Wärter kann leicht mehrere Kessel in einem Kesselhause bedienen.

Ausrüstungsgegenstände eines Dampfkessels. Betrachten wir jetzt noch die wichtigsten notwendigen Ausrüstungsgegenstände eines Dampfkessels; einen haben wir schon früher erwähnt, den **Rauchschieber** zur Regulierung des Zuges. Zur Erneuerung des Kesselwassers dienen die **Speisepumpen**; jeder Kessel muß zwei selbständige Speisepumpen haben, von denen mindestens eine von dem Betriebe der zugehörigen Dampfmaschine unabhängig ist. Man hat hauptsächlich zwei Arten Speiseeinrichtungen, Druckpumpen, die von der Betriebsdampfmaschine in Gang gesetzt werden oder auch für sich selbständige Dampfpumpen sind, und Strahlpumpen oder Injektoren, die direkt mit dem Kesseldampfe betrieben werden. Die erste brauchbare Konstruktion eines Injektors ist 1858 von dem französischen Ingenieur **Giffard** erfunden worden; derselbe ist in Abb. 940 im Schnitt dargestellt. Durch das Dampfrohr A mit Hahn H strömt gespannter Kesseldampf durch Löcher in das Rohr B, welches am unteren Ende in die Düse C ausläuft; letztere mündet in die Kammer D, welche durch den Stutzen b mit dem Wasserzufluß- oder Saugrohr in Verbindung steht und nach unten in ein konisches Rohr E ausläuft.

Der Dampfstrahl reißt das Wasser aus der Wasserkammer durch diese Düse fort und preßt es bei R strahlförmig durch das gegenüberliegende Mundstück C in das Druckrohr K und durch das Speiseventil V nach L in den Kessel. Ein Teil des Wassers tritt indessen nicht in die Düse G ein, sondern sammelt sich in dem Gehäuse R, von wo es durch das Rohr S abfließt. Durch eine mittels der Kurbel M einstellbare Regulierspindel kann eine Verengung der Dampfdüse C bewirkt und so die Dampfzuströmung und damit die Leistung reguliert werden. Weiteres über Strahlpumpen, z. B. auch den Körtingschen Universalinjektor für Kesselspeisung findet sich im ersten Abschnitt dieses Bandes.

Die anderen, an jedem Kessel befindlichen Zubehörteile, welche man unter dem Namen der Kesselarmatur zusammenfaßt, bezwecken hauptsächlich Sicherheitsmaßregeln, sowie die Beobachtung des Dampfdruckes und des Wasserstandes im Kessel. In erster Linie ist hier das Sicherheitsventil zu nennen; dasselbe sitzt auf dem Kessel, bei kombinierten Kesseln auf dem Oberkessel, bei Kesseln mit Dampfdom auf oder an letzterem. Die Sicherheitsventile werden mit Federbelastung und mit Hebel-Gewichtsbelastung konstruiert; in beiden Fällen ist ein Ventil, welches eine genügend große Dampfaustrittsöffnung verschließt, entgegen dem inneren Dampfdruck von außen derart belastet, daß bei einer bestimmten Höhe des Dampfdruckes dieser gegen die äußere Belastung das Übergewicht bekommt und das Ventil öffnet, so daß der Dampf ausblasen kann. Hierdurch wird verhindert, daß der Dampf die zulässige maximale Spannung im Kessel übersteigt. An der Vorderseite des Kessels ist ein Manometer angebracht, welches mit dem Innenraum des Kessels verbunden ist und an einer Skala den Dampfdruck in Atmosphären oder in Kilogramm Druck pro Quadratzentimeter anzeigt. Ferner ist noch ein meist doppeltes Wasserstandsglas angebracht, welches mit dem Wasserraum des Kessels in Verbindung steht und den Wasserstand in letzterem erkennen läßt; derselbe darf nie unter eine bestimmte Höhe fallen, welche so bemessen ist, daß alle von den Heizgasen im ersten und zweiten Feuerzuge bestrichenen Stellen der Kesselwandung im Innern vom Wasser berührt werden, so daß sie die aufgenommene Wärme direkt an letzteres abgeben können, wodurch eine zu hohe Erwärmung oder gar ein Glühendwerden der Kesselbleche verhindert wird. Manche Kessel sind noch mit weiteren Sicherheitsmaßregeln ausgerüstet, z. B. mit Schwimmern, welche beim Sinken des Wasserstandes unter den zulässigen tiefsten Stand ein Läutewerk zur Warnung der Kesselwärter in Gang setzen und zur Einführung von frischem Speisewasser mahnen. Jeder Kessel ist schließlich mit dem sogenannten Mannloch versehen, einer durch einen Deckel verschlossenen, meist ovalen Öffnung, welche so groß ist, daß ein Mann in den Kessel einsteigen kann zu Revisionen und besonders zur periodischen Entfernung des angesetzten Kesselsteines.

Kesselstein und Kesselexplosionen. Der Kesselstein ist eine der lästigsten Erscheinungen im Dampfkesselbetriebe und kann selbst Explosionsgefahr hervorrufen. Er entsteht dadurch, daß die im Speisewasser gelösten Salze, besonders kohlensaurer Kalk und kohlensaure Magnesia beim Verdampfen des Wassers sich ausscheiden und auf dem Boden und an den Kesselwänden sich absetzen. Bei Walzen- und Flammrohrkesseln ohne Zirkulation geschieht dies besonders an den direkt von den heißen Feuergasen bestrichenen Heizflächen, da hier die intensivste Verdampfung des Wassers stattfindet. Der Kesselstein setzt sich hier als feste Kruste an der Kesselwand ab, welche nur durch Abpicken mit spitzen Hämmern zu beseitigen ist. Bei Kesseln mit starker Zirkulation, z. B. Röhrenkesseln wird das direkte Absetzen und Festbrennen verhindert, indem durch die stete Wasserströmung die ausgeschiedene Kesselsteinsubstanz mitgeführt wird und sich in solchen Teilen des Kessels, wo weniger starke Wasserbewegung herrscht z. B. in den Oberkesseln, auf dem Boden als Schlamm absetzt. Die Stärke der Kesselsteinbildung hängt von dem Gehalte des Speisewassers an Kesselsteinbildnern oder, wie man sagt, von der Härte des Wassers ab; ein Teil kohlensaurer Kalk oder die äquivalente d. h. in chemischer Beziehung gleichwertige Menge Magnesia in 100 000 Teilen Wasser gilt als ein deutscher Härtegrad; Wasser von 10—12 deutschen Härtegraden gilt noch als weich und zur Kesselspeisung geeignet, während man Wasser mit über 16 Härtegraden als hart bezeichnet. Die Härte

des Wassers hängt von dem Ursprung desselben ab; Regenwasser ist ganz weich, es enthält gar keine Kesselsteinbildner, denn bei der Verdunstung des Wassers, wodurch ja die Wolken und Niederschläge entstehen, bleiben die gelösten Salze zurück; Regenwasser ist natürlich destilliertes Wasser; es ist nur verunreinigt durch Aufnahme von löslichen Bestandteilen aus der Luft; infolgedessen ist auch Flußwasser, wenn der Wasserlauf hauptsächlich von Oberflächenwasser, nicht vorwiegend von Grundwasser gespeist wird, meist weich und zu Kesselspeisewasser geeignet; Grundwasser und Quellwasser hingegen hat beim Durchsickern durch die Bodenschichten stets Mineralien gelöst aufgenommen; es ist meist härter, und zwar hängt die Härte von der Beschaffenheit des Bodens ab. Manches Grundwasser von 25 und mehr Härtegraden ist zum Kesselbetrieb sehr ungeeignet, da sich in kurzer Zeit erhebliche Kesselsteinablagerungen im Kessel bilden. Man kann sich aber in solchen Fällen dadurch helfen, daß man das Wasser vorher ganz oder zum großen Teile von den Kesselsteinbildnern befreit, es weich macht; dies geschieht durch Ausscheidung derselben mittels gewisser Chemikalien; man kann die Ausscheidung in besonderen Apparaten bewirken, so daß nur gereinigtes kesselsteinfreies Wasser in den Kessel gelangt. Dieses Verfahren ist unbedingt das beste, und es gibt eine Reihe von Apparaten und Einrichtungen, mit denen dies auf sichere und einfache Weise bewirkt werden kann. Ein billigeres aber weniger vollkommenes Verfahren besteht darin, mit dem Speisewasser solche Chemikalien in den Kessel einzuführen, welche die den Kesselstein bildenden Bestandteile als weichen Schlamm ausfällen, der leichter bei der Reinigung zu beseitigen ist, als der festgebrannte eigentliche Kesselstein. Bei beiden Verfahren kann die richtige Auswahl und Menge der zuzusetzenden Substanzen nur durch genaue chemische Untersuchung des Wassers oder durch praktische Versuche Sachverständiger bestimmt werden. So leicht dies auch einzusehen ist, werden doch immerwährend durch marktschreierische Reklame „Kesselsteinverhütungsmittel“ angepriesen, welche nach einem bestimmten Schema für jedes beliebige Wasser geeignet sein sollen; häufig sind solche Mittel ganz oder fast wirkungslos, zuweilen sogar schädlich für den Kessel, indem sie die Blechwände angreifen; derartige Anpreisungen, wenn sie sich nicht direkt als Schwindel darstellen, sind jedenfalls mit großer Vorsicht zu betrachten.

Der Kesselstein kann, wie schon oben angedeutet, unter Umständen die Gefahr einer Kesselexplosion herbeiführen; wenn sich, besonders bei Walzen und Flammrohrkesseln, an den direkt von den Feuergasen bestrichenen Kesselwänden inwendig eine dicke Kruste bildet, dann wird die Wärmeübertragung an das Kesselwasser in hohem Grade beeinträchtigt. Hierdurch wird zunächst die Leistungsfähigkeit des Kessels und die Kohlenökonomie verringert; aber es kann auch so weit kommen, daß die Kesselwandung durch zu schlechte Wärmeabgabe glühend wird, und dann ist die Bedingung zu einem Reißen des Kessels an dieser Stelle, also zu einer Explosion gegeben.

Ganz und mit aller Sicherheit kann die Explosionsgefahr bei Dampfkesseln, die nicht wirkliche Sicherheitskessel sind, auch beim Fehlen von Kesselstein und bei allen Sicherheitsmaßregeln nicht ausgeschlossen werden; stets kommt es auf die Achtsamkeit und Zuverlässigkeit des Kesselwärters an. Ganz abgesehen von dem äußerst verwerflichen, als schlimmsten Unfug zu bezeichnenden und gesetzlich direkt verbotenen Feststellen oder zu großen Belasten des Sicherheitsventiles, welches zuweilen vorkommt, um mit höherem Dampfdruck arbeiten zu können, als der zulässigen Grenze und der ordnungsmäßigen Einstellung des Sicherheitsventils entspricht, braucht nur der Kesselwärter eine Zeitlang den Wasserstand nicht zu beobachten, den Zeitpunkt der notwendigen Zuführung frischen Speisewassers zu versäumen, dann kann durch Wassermangel eine Explosion hervorgerufen werden. Alljährlich fallen zahlreiche Menschenleben den Dampfkesselexplosionen zum Opfer, werden große Summen an Arbeit und Kapital vernichtet, die Früchte jahrelangen Fleißes in wenigen Sekunden in Schutt und Trümmer verwandelt. Nach den statistischen Ermittelungen haben im Deutschen Reiche in den Jahren 1877—1887 168 Dampfkesselexplosionen stattgefunden, durch welche 177 Personen getötet, 97 schwer und 244 leicht verletzt worden sind. Die fürchterlichste Explosion fand im Jahre 1887 auf dem Eisenwerke Friedenshütte in Oberschlesien statt; in der Nacht vom 24. zum 25. Juli flogen

dort auf einmal 22 Dampfkessel in die Luft, wobei 12 Personen den Tod fanden und 35 verletzt wurden.

„Wohlthätig ist des Feuers Macht,
Wenn sie der Mensch bezähmt, bewacht."

Der Mensch hat sich durch seine Intelligenz die Naturkräfte und ganz besonders das Feuer praktisch dienstbar gemacht, nachdem er durch die wissenschaftlichen Forschungen ihre Wirkungen erkannt hat; eben diese Erkenntnis ihrer Wirkungen befähigt uns und muß uns veranlassen, die Vorsichtsmaßregeln anzuwenden, daß diese Kräfte nicht Zerstörung und Verderben hervorrufen.

Wirkungsprinzip und Wirkungsgrad der Dampfmaschinen.

Wirkung des Kessels. Wirkung des Wasserdampfes im Cylinder. Volldruckmaschine; Expansion; Kondensation. Kreislauf. Wirkungsgrad von Dampfkessel und Dampfmaschine. Dampf- und Kohlenverbrauch verschiedener Dampfmaschinen. Verbesserungsfähigkeit der Dampfmaschinen.

Schon bei der geschichtlichen und technischen Entwickelung der Dampfmaschinen haben wir kurz die Wirkungsweise der älteren, sowie auch der neueren Dampfmaschinen besprochen; wir wollen nun hier in zusammenfassender Weise noch etwas näher auf das Prinzip der Dampfmaschinen eingehen.

Alle Konstruktionen stimmen bezüglich der Arbeitsweise darin überein, daß durch Wärme in einem Behälter, dem Kessel, aus Wasser Dampf erzeugt wird, der unter Arbeitsleistung einen Kolben in einem Cylinder in hin- und hergehende Bewegung versetzt. In dem Kessel wird durch Zufuhr von Wärme das Wasser zuerst bis zum Siedepunkte erhitzt; die weitere Wärmezuführung bewirkt jetzt zunächst keine weitere Temperaturerhöhung, sondern eine Verdampfung des Wassers; sie wird in die latente Verdampfungswärme des Wasserdampfes übergeführt, und zwar sind zur Verdampfung von jedem Kilogramm Wasser von Siedetemperatur 536 Kalorien erforderlich; der Kessel enthält jetzt Wasser von Siedetemperatur und gesättigten Dampf von 100° C. und atmosphärischer Spannung. Durch weitere Erwärmung treten nun die Gesetze über das Verhalten von Dämpfen bei veränderlichem Druck und veränderlicher Temperatur in Kraft; es wird noch ein weiteres Quantum Wasser verdampft; der neu entwickelte Dampf muß aber in dem geschlossenen Raum des Kessels eine höhere Spannung des schon vorhandenen Dampfes bewirken; da aber anderseits bei höherem Drucke der Siedepunkt des Wassers höher liegt, als bei 100° C., so wird gleichzeitig eine Erwärmung des Wassers und Dampfes über 100° hinaus stattfinden. Dampfspannung und Temperatur steigen also bei andauernder Wärmezufuhr in einem bestimmten Verhältnis, so daß z. B. bei einem Kesseldrucke von fünf Atmosphären die Temperatur 152° C. beträgt. Der Dampf im Kessel befindet sich stets genau auf dem Sättigungspunkte; bei jeder Temperaturerniedrigung kondensiert ein Teil desselben, während bei Erhöhung der Temperatur die Spannung steigt; meist sind in dem Dampfe auch noch feine Wasserbläschen schwebend suspendiert, besonders bei heftigem Sieden des Wassers; man sagt, der Dampf sei „naß" im Gegensatze zu wasserfreiem „trockenem" Dampfe. Der Kessel ist also gleichzeitig der Generator (Erzeuger) des Wasserdampfes, und der Verdichter desselben; er enthält einen Vorrat eines Stoffes, des Wasserdampfes, der eine gewisse Menge Wärme, also Energie aufgespeichert enthält, und der sich durch seine besonderen Eigenschaften in vorzüglicher Weise eignet, diese Energie abzugeben, um mechanische Arbeit zu leisten.

Der Vorgang dieser Umwandlung geschieht im Cylinder der Dampfmaschine; hierbei kann der Dampf auf verschiedene Weise wirken. Die einfachste Art wäre diejenige, wenn der Kolben von dem aus dem Kessel in den Cylinder strömenden Dampfe abwechselnd ganz von einem Ende des Hubes bis zum anderen getrieben würde. Eine derartige Maschine, die man als Volldruckdampfmaschine bezeichnen könnte, würde eigentlich gar nicht zu den kalorischen Maschinen gehören; die im Cylinder verrichtete Arbeit würde gar nicht von der Wärme oder der Energie des in dem Cylinder enthaltenen Dampfes herrühren; letzterer würde vielmehr lediglich ein rein mechanisches und indifferentes Zwischen-

mittel sein, ebenso wie z. B. Druckwasser, welches durch den Druck einer hohen Wassersäule oder das Gewicht eines Akkumulators eine Wassersäulenmaschine betreibt; die Arbeit würde vom Kessel geleistet; der durch Nachschub und Druck auf das Zwischenmittel, den in der Rohrleitung und im Cylinder enthaltenen Dampf wirkte; letzterer würde den Cylinder mit demselben Druck und derselben Temperatur, also derselben Energie verlassen, die er beim Eintritte in den Cylinder hatte. Letzterer bildete gleichsam einen Teil des Kessels; beim Vorwärtsgehen des Kolbens vergrößerte sich der mit dem Kessel in Verbindung stehende Cylinderraum, das ganze Volumen von Kessel und Cylinder vergrößerte sich, und es fände eine entsprechende Druckabnahme statt, welche aber sofort in demselben Momente durch Entwickelung neuen Dampfes ausgeglichen würde. Die eigentliche Arbeiterzeugung fände also bei dieser Anordnung nur direkt an der Kesselwand durch Zuführung von äußerer Wärme und Verwendung derselben zur Erzeugung von Dampf und Druck statt. Solche Volldruckdampfmaschinen werden indessen in der Praxis nicht gebaut; es ist ohne weiteres einzusehen, daß dieselben sehr ungünstig arbeiten würden, da, wie schon erwähnt, der verbrauchte Dampf beim Hubwechsel den Cylinder mit seiner ganzen Wärme, also Energie verläßt, ohne daß diese ausgenutzt worden ist.

Diese Energie kommt erst dann zur Wirkung, wenn die Verbindung zwischen Kessel und Cylinder unterbrochen wird; dann wird die Arbeitsfähigkeit des in letzterem abgeschlossenen Dampfquantums zur Arbeitsleistung verwendet. Zu diesem Zweck wird stets die Dampfeinströmung in den Cylinder geschlossen, wenn der Kolben erst einen Teil seines Hubes gemacht hat; der im Cylinder abgesperrte Dampf wirkt dann durch Expansion, er drückt den Kolben durch seine Spannkraft vorwärts, wobei infolge des immer größer werdenden Volumens der Druck und gleichzeitig die Temperatur immer geringer wird. Die hierbei geleistete Arbeit ist genau äquivalent der Wärmeverringerung des Dampfes; die Einströmung frischen Dampfes in den Cylinder heißt die Admission und die Zeit derselben die Admissionsperiode; das Verhältnis des Hubes während der Admission zum vollen Hube nennt man die Füllung oder den Füllungsgrad: „eine Maschine arbeitet mit $1/3$ Füllung“ heißt also, während $1/3$ des Kolbenhubes ist die Dampfeinströmung geöffnet, es wirkt also der volle Kesseldruck; während des restierenden $2/3$ des Hubes arbeitet der Dampf durch Expansion. Die gesamte während des Hubes abgegebene Arbeit besteht aus zwei Teilen; der während der Admission, wie wir vorher gesehen haben, direkt vom Kessel mit konstantem Druck und konstanter Temperatur geleisteten und der während der Expansion durch die innere Energie des Dampfes erzeugten. Je kleiner der erstere und je größer der letztere Anteil wird, d. h. also je geringer die Füllung ist und je weiter die Expansion getrieben wird, desto vorteilhafter muß theoretisch die Wirkung der Maschine sein, denn desto vollständiger wird die Energie des Dampfes ausgenutzt. Bei Maschinen ohne Kondensation wird die Grenze der Expansionsfähigkeit erreicht, wenn der Dampfdruck in dem Cylinder gleich dem äußeren Luftdruck, also gleich einer Atmosphäre (absolute Spannung, also ohne Überdruck) ist; hierbei würde der Dampf sich bis auf 100° C. abkühlen; mit dem Hubwechsel entweicht der ausgenutzte Dampf in die Luft, er wird „ausgepufft“, wie der übliche Ausdruck lautet, und diese Maschinen heißen Auspuffmaschinen. Bei den Maschinen mit Kondensation geht der Spannungs- und Temperaturabfall und damit die Ausnutzung der Dampfwärme noch weiter; wenn der Dampf den Kolben bis zum Ende des Hubes gedrückt hat, dann wird beim Rückgange des Kolbens der Dampf in den Kondensator geleitet, wo er durch Einspritzen von kaltem Wasser (Einspritzkondensatoren) oder Vorbeiströmen an gekühlten Flächen (Oberflächenkondensatoren) kondensiert wird; hierdurch kann sein Druck bis auf annähernd Null herabgezogen werden; derselbe hängt ab von der Menge und Temperatur des Kühlwassers; wird dasselbe z. B. durch den kondensierenden Dampf auf 50° C. erwärmt, so beträgt der Druck im Kondensator etwa 7 cm Quecksilbersäule oder $1/11$ Atmosphäre, d. h. es herrscht ein Vakuum von 69 cm; im Cylinder ist also auf der einen Kolbenseite ein Unterdruck von etwa $10/11$ Atmosphäre, um welchen die Wirkung des Dampfdruckes von der anderen Kolbenseite zunimmt. Wird nun das Kondensationswasser der Kesselspeisepumpe zugeleitet und wieder in den Kessel zurückgeführt, wie es häufig in der Praxis

geschieht, so haben wir einen Kreislauf: das Wasser wird in einem Gefäße, dem Kessel, durch äußere Wärmezuführung verdampft, gibt in einem zweiten Raume, dem Cylinder, die Wärme in Form von mechanischer Arbeit teilweise wieder ab, wird schließlich im Kondensator durch weitere Wärmeentziehung wieder in Wasser von der Anfangstemperatur zurückgeführt und von neuem in den Kessel gebracht.

Man könnte glauben, daß durch einen solchen Kreislauf eine sehr hohe Ausnutzung der gesamten aufgewendeten Wärme erzielt, also beinahe in idealer Weise die Aufgabe gelöst werden könne, Wärme in mechanische Arbeit umzuwandeln; wenn wir aber den Verlauf näher betrachten, die Ausgaben und Einnahmen, nämlich die durch Verbrennung der Kohlen zugeführte Wärmemenge und die gewonnene mechanische Arbeitsleistung vergleichen, so finden wir, daß dies keineswegs der Fall ist, daß vielmehr nur ein sehr geringer Teil der Verbrennungswärme in Nutzarbeit umgewandelt wird. Bei der vollkommenen Verbrennung eines bestimmten Brennmaterials wird eine bestimmte Wärmemenge entwickelt, z. B. bei guten Flammkohlen 7500—8000 Kalorien aus 1 kg; zunächst nützen nun keine Dampfkessel, auch nicht solche von bester Konstruktion mit rauchverzehrender Feuerung, selbst nicht mit der vollkommenen Gasheizung, den Heizwert des Brennmaterials vollkommen zur Übertragung an das Kesselwasser aus; es entstehen vielmehr Wärmeverluste durch Ausstrahlung, in den allermeisten Fällen durch unvollkommene Verbrennung oder Luftüberschuß, durch die unvermeidliche, für die Verbrennung nutzlose Miterwärmung des Stickstoffs der atmosphärischen Verbrennungsluft, sowie besonders durch die wegen des Zuges notwendige hohe und meist zu hohe Temperatur der in den Schornstein entweichenden Feuergase. Hierdurch arbeiten die Dampferzeuger im allgemeinen nur mit etwa 60—80% thermischem Nutzeffekt, d. h. sie übertragen nur diesen Anteil der in dem Brennmaterial enthaltenen Energie an das Kesselwasser und durch dieses weiter an den Wasserdampf; praktisch ausgedrückt werden in guten Kesseln mit 1 kg guter Kohlen aus 1 kg Wasser von 20° C. etwa 7—9 kg Dampf von 6 Atmosphären Spannung erzeugt. Mit der in diesem enthaltenen Wärmemenge oder Energie wirtschaftet nun die Dampfmaschine weiter, indessen mit sehr geringem thermischen Nutzeffekt; sie kann nur einen recht geringen Teil der in dem gespannten Dampfe enthaltenen Wärmemenge in nutzbare lebendige Kraft, mechanische Arbeit umwandeln, welche von der Kolbenstange oder der Kurbelwelle aus entnommen und übertragen werden kann. Den Grund hierfür erkennen wir darin, daß der Vermittler der ganzen Transaktion, der Kraftträger Wasserdampf, unter keinen Umständen das ihm in der Form von Wärme übertragene Energiekapital ganz als Arbeitsleistung wieder herausgibt; wir können noch so genau den Gang der Umwandlungen kontrollieren, durch alle möglichen Mittel Verluste hintenanhalten, stets geht ein beträchtlicher Anteil der gesamten aufgewendeten Wärme verloren, wenigstens für die Ausnutzung zur Arbeitsleistung; hiervon kann weder die vollkommenste Verbrennungsanlage für die Kohlen, die beste Kesselanordnung, noch die vorzüglichste Konstruktion der Dampfmaschine etwas ändern; der Verlust ist vielmehr mit dem Wirkungsprinzip der Dampfmaschine untrennbar verbunden, selbst wenn wir von den unvermeidlichen, aber durch konstruktive Mittel auf ein Minimum beschränkbaren oben genannten Verlusten im Kessel und den weiteren durch Wärmeabgabe an den Wänden der Dampfrohrleitung und Dampfcylinder, sowie von allen Reibungsverlusten der Maschine ganz absehen. Es wird nämlich stets nur die Differenz der Wärmemenge oder das Wärmegefälle zwischen der dem Kesseldrucke oder der Admissionsspannung entsprechenden Temperatur und der Temperatur bei dem Spannungszustande des die Maschine verlassenden Dampfes ausgenutzt; in letzterem ist noch die latente Verdampfungswärme enthalten, welche dem Wasser im Kessel zur Dampfbildung zugeführt worden ist; diese sowie der Wärmeunterschied zwischen dem abgehenden Dampfe und dem Kesselspeisewasser können nicht wieder zur Arbeitsleistung nutzbar zurückgewonnen werden und gehen unter allen Umständen verloren. Bei den Auspuffmaschinen ist dieser Verlust ohne weiteres klar, denn der Dampf geht ja mit seiner latenten Dampfwärme und seiner Temperatur von 100° C. ohne weiteres in die Luft; bei der Kondensationsmaschine erwärmt der Dampf im Kondensator das Kühlwasser; wenn auch das aus dem Dampfe gebildete Kondensationswasser mit einer

gewissen Temperatur dem Kessel zugeführt wird, so fließt doch das den Kondensator kühlende Wasser mit einer bedeutenden, dem Dampfe entzogenen Wärmemenge ab. Bei der Kondensationsmaschine wird gegen die Auspuffmaschine von 100° C. nur noch die Dampfspannung von 1 Atmosphäre bis nahezu 0, entsprechend dem Temperaturgefälle von 100° C. bis 40 oder 50° C. ausgenutzt. Wenn der Auspuffdampf oder das warme Kondensationswasser zu anderen Zwecken verwendet werden können, z. B. zum Heizen von Räumen, wie es vielfach geschieht, dann wird auch die latente Dampfwärme nutzbar gemacht, aber dies hat nichts mehr mit der Wirksamkeit der Dampfmaschine zu thun; für diese bleibt stets die Verdampfungswärme verloren.

Da dieser Verlust für eine gewisse Dampfmenge eine bestimmte, gleichbleibende Größe hat, bei Verwendung höherer Dampfdrucke aber eine größere absolute Leistung erzielt wird, so sinkt der relative Verlust mit höheren Dampfspannungen; dies ist in besonders hohem Maße der Fall bei Hochdruckmaschinen ohne Kondensation; soll bei solchen der Dampf bis auf atmosphärische Spannung expandieren, so ist z. B. bei einer Admissionsspannung von 2 Atmosphären theoretisch ein Füllungsgrad von 0,53 erforderlich und für beispielsweise 1 Pferdestärke Leistung ist theoretisch erforderlich rund 21 kg Dampf; arbeitet man dagegen mit 8 Atmosphären Kesseldruck, so braucht die Füllung nur 0,13 zu betragen und der Dampfverbrauch sinkt für dieselbe Leistung auf 6,8 kg. Verfolgen wir das Beispiel weiter für eine Kondensationsmaschine, bei welcher im Kondensator $^1/_6$ Atmosphäre Druck herrscht, so haben wir bei 2 Atmosphären Kesseldruck einen Füllungsgrad von 0,04 und einen theoretischen Dampfverbrauch von 3,8 kg pro Pferdestärke Arbeit; bei 8 Atmosphären dagegen nur 0,01 Füllung und 2,7 kg Dampfverbrauch. Diese Zahlen sind freilich rein theoretische, nach der mechanischen Wärmetheorie berechnete; die wirklich notwendigen Füllungsgrade und der thatsächliche Dampfverbrauch sind in allen Fällen viel höher; aber sie beweisen doch schlagend den Nutzen höherer Dampfspannung, der denn auch längst erkannt ist und allgemein angewendet wird.

Wir wollen bei dieser Gelegenheit noch die im praktischen Leben häufig vorkommenden Begriffe „effektive“ und „indizierte“ Pferdestärke klarlegen. Ersterer entspricht seiner den Sinn treffenden Wortbezeichnung; es ist die thatsächlich von der Maschine an der Kurbelwelle oder am Balancier nutzbar abgegebene mechanische Leistung einer Pferdestärke; die indizierte Pferdestärke dagegen wird rechnerisch aus den Dampfdrucken abgeleitet, die in jedem Punkt eines Doppelhubes von beiden Seiten auf den Kolben wirken; die indizierte Leistung bedeutet also die vom Dampfe auf den Kolben übertragene Arbeit; letztere ist stets größer als die effektive, außen abgegebene Arbeit, und die Differenz liegt in den Widerständen der Maschine selbst. Im praktischen Leben hat die indizierte Leistung oder der Dampfverbrauch pro indizierte Pferdestärke nur Wert für den Dampfmaschinenkonstrukteur, denn bei der Bestimmung der indizierten Leistung mit dem dazu dienenden, schon von Watt erfundenen Apparate, dem Indikator, lernt er genau die Arbeitsweise und eventuell die Mängel der Maschine kennen, durch deren Beseitigung er die Leistung erhöhen kann. Für den Gewerbetreibenden, der eine Dampfmaschine benutzt, kommt es nur auf die effektive Leistung und die Frage an, wie viel Dampf von bestimmter Kesselspannung die Maschine für die Pferdekraft braucht.

Betrachten wir nun den Wirkungsgrad für eine kleinere Hochdruckmaschine ohne Kondensation (Auspuffmaschine) eine mittelgroße moderne zweicylindrige Verbundmaschine, beide für 6 Atmosphären Kesselspannung und schließlich eine Triple-(dreifach-)Expansionsmaschine größter und bester Art. Der Dampfverbrauch kleinerer Hochdruckmaschinen ist nach der Konstruktion, mehr oder weniger guter Dampfverteilungseinrichtung durch die Steuerung, nach der Bauart und besonders auch der Kolbengeschwindigkeit sehr verschieden; im Mittel mag derselbe zu 25 kg pro Stunde bei 6 Atmosphären Admissionsspannung angenommen werden; 1 kg Dampf von dieser Spannung hat 635 Kalorien Gesamtwärme (von 20° Temperatur des Speisewassers ab gerechnet), die ihm im Dampfkessel zugeführt worden sind; da 1 Kalorie nach früherem (vgl. I. Abschnitt) äquivalent 425 mkg ist, so enthält 1 kg Dampf $635 \times 425 = 269875$ mkg Energie und leistet $^1/_{25}$ Pferdestärke = 3 Sekundenmeterkilogramm eine Stunde lang, also $3 \times 60 \times 60 =$

10800 mkg Arbeit; der Wirkungsgrad ist also $\frac{10800}{269875} = 0{,}04$ oder 4 %. Eine Verbundmaschine mittlerer Größe mit zweifacher Expansion braucht etwa 10 kg Dampf von 6 Atmosphären pro effektive Pferdestärke; die Rechnung stellt sich also hierbei so, daß 1 kg Dampf $^1/_{10}$ Pferdestärke oder 7,5 Sekundenmeterkilogramm leistet; der Wirkungsgrad ist also $\frac{7{,}5 \cdot 3600}{269875}$ oder rund 10 %. Die größten und besten Triple-Expansionsmaschinen brauchen dagegen nur 6 kg Dampf, allerdings mit 10 Atmosphären Admissionsdruck; 1 kg leistet also 12,5 Sekundenmeterkilogramm; die Wärmemenge (wieder über 20° C. gerechnet) beträgt 642 Kalorien; ebenso wie vorher finden wir also den Wirkungsgrad zu $\frac{12{,}5 \times 60 \times 60}{642 \quad 425} = {}^1/_6$ oder $16^1/_2$ %. Der Auspuffdampf bei Hochdruckmaschinen kann also vorteilhaft zur hohen Vorerwärmung des Speisewassers benutzt werden; es gibt verschiedene einfache Apparate, mit denen dies in zweckmäßiger Weise geschieht; ebenso kann das Kondensationswasser bei Verbund- und anderen Kondensationsmaschinen direkt zur Kesselspeisung verwendet werden. Da hierdurch nicht so viel Wärme gebraucht wird, um das Wasser im Kessel bis zum Siedepunkte zu erhitzen, so wird der Wirkungsgrad in allen Fällen günstiger.

Untersuchen wir nun noch weiter, wie viel von der wirklich verbrauchten Wärme des Wasserdampfes die Dampfmaschine in Arbeit umwandelt, so haben wir nur das Wärmegefälle zwischen dem Dampfe im Anfangs- und im Endzustande in Betracht zu ziehen; die Menge der latenten und der sich in der höheren Temperatur des austretenden Dampfes gegen die ursprüngliche Wassertemperatur dokumentierenden Wärme werden von der gesamten im Wasserdampfe enthaltenen Wärme abgezogen, da sie von der Maschine nicht benutzt werden kann, dagegen für andere Zwecke verfügbar sind. Bei dem letzten Beispiele würde sich unter diesem Gesichtspunkte ein Wirkungsgrad der besten großen Compoundmaschinen von etwa 77 % ergeben. Die Dampfmaschinen nutzen also den bei ihrem Wirkungsprinzip überhaupt für die Umwandlung in mechanische Arbeit in Frage kommenden — man könnte sagen, brauchbaren — Teil der zugeführten Wärme recht gut aus, ebensogut wie die besten Wasserräder und Turbinen.

Sehr häufig, ja fast meistens hört man direkt den Kohlenverbrauch mit der Maschinenleistung zusammensetzen; das ist aber im allgemeinen durchaus unzulässig und kann gar kein richtiges Urteil über die Güte der Dampfmaschine geben, denn der Kohlenverbrauch ist ja auch vom Dampfkessel und von der Qualität, dem Heizwerte der Kohle abhängig. Eine Maschine, die pro Pferdekraft und Stunde 2 kg Kohlen braucht, kann vielleicht besser arbeiten, als eine andere, die nur 1,5 kg braucht, wenn nämlich bei ersterer die Wärme im Kessel schlecht ausgenutzt wird. Nur wenn Dampfkessel und Dampfmaschine zusammengefaßt als einheitliche Anlage betrachtet werden, also von einer Fabrik geliefert sind, dann kann direkt die Maschinenleistung mit dem Verbrauch an Brennmaterial von bestimmter Heizkraft verglichen werden; für gewöhnlich aber muß man die Leistung des Kessels und diejenige der Maschine wohl auseinanderhalten. Erstere drückt sich dadurch aus, wie viel Wasser von bestimmter Temperatur und bei bestimmtem Kesseldruck mit Kohle von bestimmtem Heizwerte verdampft wird; man kann also den Wirkungsgrad eines Kessels z. B. nach der Angabe beurteilen, daß mit 1 kg Kohle von 8000 Kalorien Heizwert bei 8 Atmosphären Kesselspannung 7,5 kg Speisewasser von 30° C. verdampft werde; keine dieser Angaben ist für die Beurteilung überflüssig. Bei der Dampfmaschine dagegen ist die für eine gewisse Leistung verbrauchte Menge Dampf von bestimmter Spannung maßgebend. Durch Kombination beider kann man dann natürlich auch auf den Gesamtwirkungsgrad der ganzen Dampfanlage, einschließlich des Kessels, und auf die effektive Maschinenleistung pro Kilogramm verbrannte Kohlen oder umgekehrt auf den Kohlenverbrauch für eine bestimmte Leistung, z. B. eine Pferdekraft und Stunde kommen. Arbeitet z. B. der Dampfkessel mit 70 % und die Dampfmaschine mit 10 % (bezogen auf die gesamte vom Kessel abgegebene Wärmemenge), so hat die ganze Dampfanlage einen Wirkungsgrad von $0{,}7 \times 0{,}1 = 0{,}07$ oder 7 %. Die Berechnung des Wirkungsgrades direkt aus der verbrannten Kohle und der geleisteten Arbeit für die ganze Anlage ist sogar viel einfacher;

man kann den Dampfverbrauch, die Einzelleistungen des Kessels und der Maschine, ganz außer acht lassen. Wenn z. B. für 1 Pferdekraftstunde Leistung 2,5 kg Kohlen von 7500 Kalorien Heizkraft verbrannt werden, so ist direkt der Wirkungsgrad $\frac{75 \times 60 \times 60}{2{,}5 \times 7500 \times 425} = 4{,}5\,\%$.

Die Dampfmaschinen sind konstruktiv zu einem sehr hohen Grade der Vollkommenheit gelangt und stehen mit ihrem bisherigen Wirkungsprinzip der Grenze der Verbesserungsfähigkeit sehr nahe; dies ist eben nach den obigen Darlegungen in ihrem Prinzip begründet, so daß durch konstruktive Verbesserungen eine Steigerung des Wirkungsgrades um einen erheblichen Betrag ganz unmöglich ist. In geringem Maße kann eine solche Steigerung noch bewirkt werden durch Anwendung noch höherer Dampfspannungen, von 12 Atmosphären und noch mehr; aber auch in dieser Richtung ist die Grenze bald erreicht wegen der zulässigen Festigkeitsbeanspruchung der Materialien einerseits, anderseits weil derartige Dampfmaschinenanlagen wegen ihrer komplizierten Konstruktion größeres Anlagekapital und größere Intelligenz des Bedienungspersonals erfordern, Umstände, welche den Vorteil der etwa noch erreichbaren geringen Dampf- und Kohlenersparnis mehr oder weniger aufheben. Dem Bestreben, durch Maschinen nach wesentlich neuen Ideen den Wasserdampf in seiner Eigenschaft als Wärme- und Kraftträger, als Zwischenglied zur Umwandlung der Verbrennungswärme der Steinkohlen in mechanische Arbeit, in vollkommenerer Weise als bisher auszunutzen, steht der Umstand entgegen, daß die für die Wärme- und Arbeitsübertragung so vorteilhaften Eigenschaften des Wasserdampfes, die Billigkeit, leichte Anwendbarkeit und Gefahrlosigkeit des Erzeugungsstoffes, des Wassers, sowie seine hohe spezifische Wärmekapazität, mit den nachteiligen Eigenschaften des hohen Siedepunktes und der hohen Verdampfungswärme unzertrennbar verbunden sind. Wenn wir einen genügend billigen Stoff hätten, der die ersten Eigenschaften besitzt, dabei aber bei 25° siedet und vielleicht eine Verdampfungswärme von 100 Kalorien hätte, dann stände die ganze Krafterzeugungsfrage auf einer gänzlich anderen Grundlage, dann könnte durch eine kalorische Maschine unter Verwendung dieses Stoffes die Kohle statt mit 5 bis 10 mit 25 bis zu 40 % ausgenutzt werden; dann könnten überhaupt andere Kraftmaschinen für größere Leistungen neben dieser idealen kalorischen Maschine kaum noch in Betracht kommen.

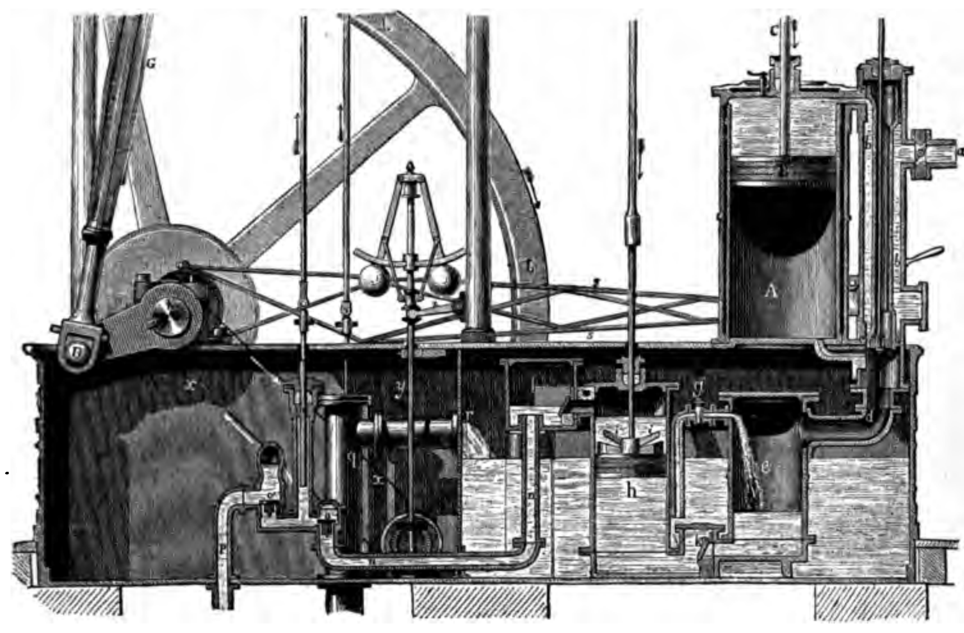
Es gibt indessen doch ein Mittel, durch Wasserdampf in vorteilhafterer Weise, als oben dargestellt, Wärme und Arbeit zu übertragen, welches in neuerer Zeit mit Erfolg angewendet worden ist und vielleicht einen Umschwung im Dampfmaschinenbau bewirken wird, ähnlich wie früher die Einführung der Expansion; es ist dies die Überhitzung des Wasserdampfes, welche weiterhin noch näher besprochen wird.

Das Wirkungsprinzip der Mehrfach-Expansions- oder Verbundmaschinen ist kein anderes, als das besprochene der gewöhnlichen Expansionsmaschine mit Kondensation. Während Einfach-Expansionsmaschinen als Hochdruckmaschinen (ohne Kondensation) arbeiten oder auch als Kondensationsmaschinen konstruiert werden können, sind Verbundmaschinen stets Kondensationsmaschinen. Da sie nach demselben Prinzip arbeiten, wie Eincylinder-Kondensationsmaschinen, so haben sie theoretisch auch denselben Wirkungsgrad; ihr Vorteil liegt allein in konstruktiven und praktischen Vorzügen, die schon früher kurz angegeben sind.

Die Konstruktion der Dampfmaschinen.

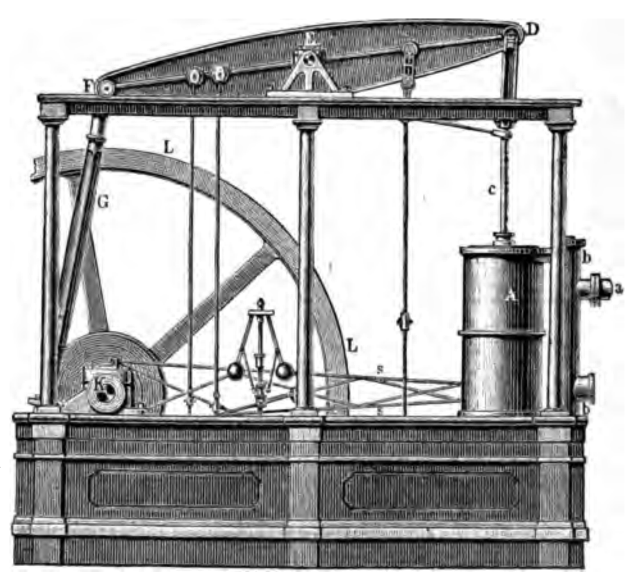
Alte Wattsche Balanciermaschine; Wattsche Dampfmaschine neuerer Konstruktion; stehende Eincylinder-Hochdruckmaschine; liegende Auspuffmaschine. Receiver-Verbunddampfmaschine. Einzelteile der Dampfmaschinen. Einteilung der Dampfmaschinen.

Betrachten wir nun nach diesen allgemeinen Darlegungen über das Wirkungsprinzip der Dampfmaschine die Konstruktion der wichtigsten Systeme und zwar zunächst an den Abb. 941 u. 942 die alte Wattsche Dampfmaschine, welche, wie schon früher erwähnt, bereits alle wichtigeren Konstruktionsteile enthält; im Schnitt (Abb. 941) ist die untere Partie im größeren Maßstabe gezeichnet, während Abb. 942 die ganze Maschine in der äußeren Ansicht wiedergibt; die Buchstabenbezeichnungen in beiden Abbildungen stimmen überein. Es ist eine doppeltwirkende Balancier-Kondensationsmaschine mit Schwungrad, also eine der späteren Konstruktionen Watts.



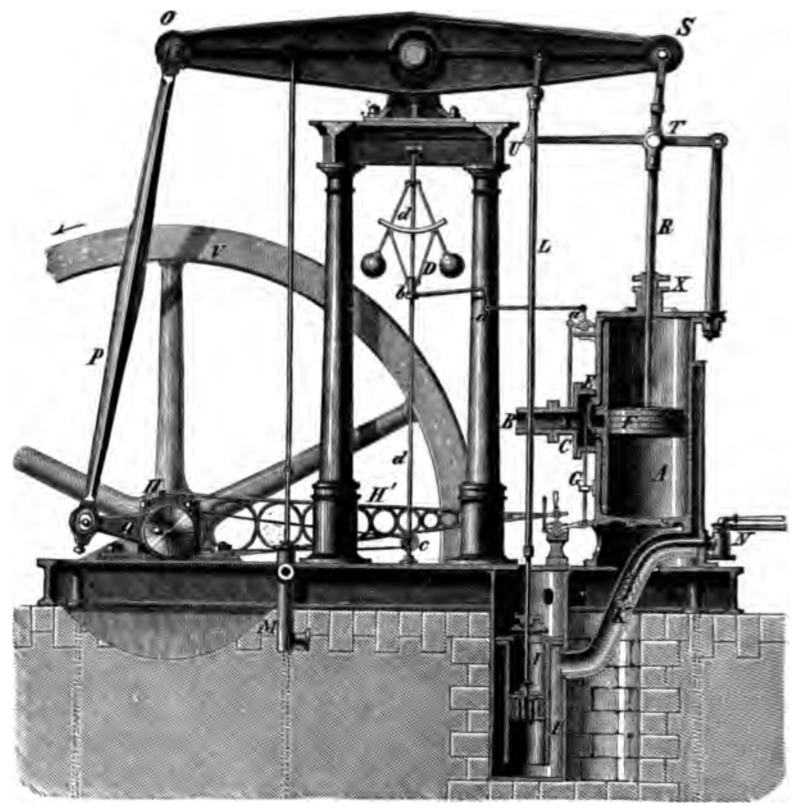
941. Watts doppeltwirkende Dampfmaschine (Schnitt).
Nach Reuleaux, „Geschichte der Dampfmaschine".

A ist der vertikale Dampfcylinder, welchem durch die Leitung a Kesseldampf zugeführt wird; in dem Cylinder bewegt sich dicht der Kolben B; der Dampf strömt zuerst in die Schieberkammer bb; dieselbe ist an beiden Enden des Cylinders, dicht am Boden und am Deckel, durch Kanäle mit dem Innenraum des Cylinders verbunden; durch einen Schieber cc, der beim Gange der Maschine durch ein auf der Kurbelwelle K sitzendes Excenter, welches wir noch später besprechen, mittels des hinter der Maschine sich horizontal hin und her bewegenden Gestänges ss und eines Winkelhebels auf und ab bewegt wird, wird abwechselnd die eine und andere Verbindung nach dem Cylinder geöffnet, so daß abwechselnd der Dampf über und unter den Kolben tritt. Mit dem Winkelhebel der Schubstange s des Excenters ist ein Handgriff so verbunden, daß zur Ingangsetzung der Maschine der Schieber zuerst mit der Hand eingestellt wird, so daß der Dampf oben oder unten einströmt und die Maschine zu laufen anfängt, worauf sie die weitere Steuerung selbst besorgt. In der Abbildung ist der obere Dampfeintritt geöffnet, während der untere Kanal vom Schieberraum abgesperrt ist; der Dampf tritt also über den Kolben und drückt diesen nieder; der vom vorigen Hube noch unter dem Kolben befindliche Dampf entweicht durch den unteren Kanal und das Rohr d nach dem Kondensator e; wenn der Kolben in der tiefsten Stellung angekommen ist, hat schon die umgekehrte Schieberstellung stattgefunden; der untere Kanal ist vom Kondensator abgeschlossen und mit dem Dampfraum des Schieberkastens in Verbindung gesetzt; dagegen kommuniziert der obere Kanal statt mit dem Dampfraume mit einem Hohl-



942. Watts doppeltwirkende Dampfmaschine.
Nach Reuleaux, „Geschichte der Dampfmaschine".

raume des Schieberkastens, der unten nach dem Rohre d offen ist; jetzt kann also beim Aufgange des Kolbens der Dampf über demselben nach dem Kondensator abströmen. Mit dem Kolben ist die *Kolbenstange* c fest verbunden, welche durch den Cylinderdeckel hindurchgeht; damit hier kein Dampf verloren gehen kann, wird durch eine *Stopfbüchse* eine dampf- und luftdichte Auf- und Abbewegung der Kolbenstange bewirkt. Die Kolbenstange ist durch einen beweglichen Bolzen mit dem einen Ende des *Balanciers* DEF verbunden. Der Balancier ist ein starker eiserner Wagebalken, der in der Mitte durch einen Zapfen in dem Lager E auf dem Maschinengestell so gelagert ist, daß er sich pendelnd auf und ab bewegen kann; die Kolbenbewegung wird also durch die Kolbenstange auf den Balancier übertragen. Das entgegengesetzte Ende des letzteren trägt bei E die *Pleuelstange* G, mit Pleuelkopf H, welche auf eine *Kurbel* wirkt und die *Welle* K mit dem *Schwungrad* L in Rotation setzt; bei jedem Doppelhube (Auf- und Abgang) des Kolbens wird auf diese Weise die Welle



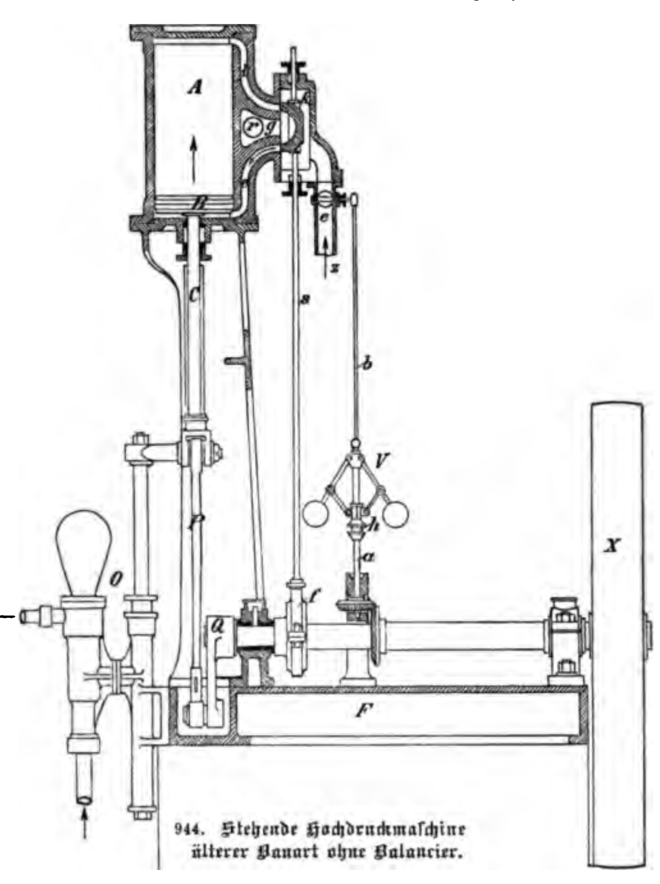
943. Wattsche Dampfmaschine neuerer Konstruktion.

einmal gedreht. Von derselben wird nun in irgend einer Weise, z. B. mittels Riemscheiben und Treibriemen die Kraft weiter übertragen.

Die Wattsche Maschine enthält noch folgende weitere Teile, die, wenn auch in anderer Anordnung, auch bei den meisten anderen Maschinen sich wiederfinden. Im untern Teile der Maschine, innerhalb des Fundamentrahmens befindet sich zunächst ein Wasserkasten, die sogenannte Zisterne; derselben wird durch die mittels einer Triebstange vom Balancier aus in Gang gesetzte *Kaltwasserpumpe* q fortwährend kaltes Wasser zugepumpt. Eine zweite in derselben Weise betriebene Pumpe, die *Luftpumpe* h steht durch das Ventil k mit dem Kondensator in Verbindung; diese hat den Zweck, fortwährend das warme Kondensationswasser und gleichzeitig die Luft aus dem Kondensator fortzuschaffen, die in jedem Wasser enthalten ist und beim Erwärmen austritt. Durch den Hahn g tritt kaltes Wasser aus der Zisterne in den Kondensator, welches den aus dem Cylinder entweichenden, verbrauchten Dampf kondensiert. Ein Teil des warmen Kondensationswassers tritt beim Ausfließen durch den kleinen Behälter l in das Saugrohr nn der *Kesselspeisewasserpumpe* m mit dem Saugventil O und Druckventil O'; der Plunger dieser Speisepumpe oder Heißwasserpumpe wird wie die anderen Pumpen, vom Balancier betrieben; hinter dem Druckventil O', über welchem sich ein kleiner Windkesselaufsatz befindet, wird das Wasser durch die Druckleitung p in den Dampfkessel gepreßt.

Zur Regulierung des Ganges dient ein schon früher beschriebener **Zentrifugalregulator** in Verbindung mit einer Drosselklappe in dem Dampfzuströmungsrohr; der Regulator dreht sich um die senkrechte Achse y; diese wird durch die Schnur xx, eine Schnurscheibe und ein Paar konische Zahnräder von der Maschinenwelle aus in schnelle Rotation gesetzt; wie bei früherer Gelegenheit dargelegt, heben oder senken sich die Schwungkugeln je nach der Umdrehungsgeschwindigkeit, welche wieder direkt von der Geschwindigkeit der Maschine abhängt, und bewegen hierbei eine Hülse auf oder ab; von letzterer wird der Hebel z bewegt, und dieser ist durch ein Hebelgestänge (in der Zeichnung nicht sichtbar) derart mit der Drosselklappe verbunden, daß letztere beim Aufgang der Hülse, also bei Geschwindigkeitsbeschleunigung mehr geschlossen wird, also weniger Dampf einläßt, und beim Sinken umgekehrt.

Abb. 943 stellt eine Wattsche Dampfmaschine neuerer Konstruktion dar; wie leicht ersichtlich, ist die Wirkungsweise und auch die allgemeine Anordnung im großen und ganzen dieselbe geblieben; nur in der Bauart und in den Einzelkonstruktionen ist manches verbessert, zweckmäßiger und eleganter gemacht, besonders der Unterteil mit den Pumpen ist anders angeordnet, die Schiebervorrichtung ist verbessert und vereinfacht; der aus dem Cylinder nach dem Kondensator entweichende Dampf muß einen ringförmigen Mantelraum um den Cylinder durchströmen, wodurch die Wandung des letzteren gegen schädliche Abkühlung durch die äußere Luft geschützt wird. Einige in den vorigen beiden Abbildungen nicht sichtbaren Teile sind hier erkennbar, so die Verbindung der Excenterschubstange mit dem Dampfschieber und die Hebelübertragung vom Regulator nach der Drosselklappe, ferner die Wattsche Geradführung RSTU, die noch besonders besprochen wird.



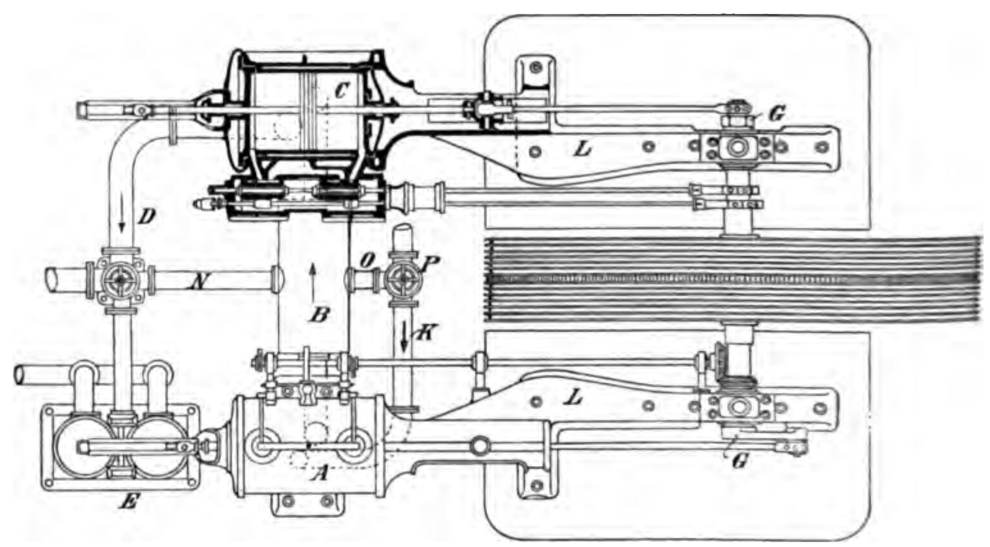
944. Stehende Hochdruckmaschine älterer Bauart ohne Balancier.

Die Erklärung der dargestellten Maschine kann nach dem Vorhergegangenen durch wenige Worte gegeben werden. A ist der Dampfcylinder mit Schieberkasten E, welchem der Dampf durch das Rohr B mit Drosselklappe C zugeführt wird; der Schieber wird mittels der Schieberstange G durch einen Winkelhebel von dem Excenter H mit Schubstange H′ bewegt. F ist der Kolben mit Kolbenstange R, welche durch die Stopfbüchse X in den Cylinderdeckel dicht geführt wird. Der Balancier OS treibt durch die Pleuelstange P die Kurbel Q, welche die Hauptwelle mit dem Schwungrad V dreht; vom Balancier wird ferner betrieben die Speisepumpe M und durch die Stange L die Luftpumpe J. Der Cylinder steht mit dem Kondensator T in Verbindung; das Kühlwasser wird von N aus durch die Kaltwasserbrause K eingespritzt. STUW ist die Geradführung oder das Wattsche Parallelogramm. Der Schwungkugelregulator D sitzt auf der Achse d, welche durch die konischen Zahnräder mittels eines Riemens von der Welle aus betrieben wird; durch das Hebelgestänge baa wirkt der Regulator auf die Drosselklappe E.

Eine stehende Eincylinder-Hochdruckmaschine älterer Bauart ohne Balancier zeigt Abb. 944 im Querschnitt. A ist der auf einem gußeisernen Gestell befestigte Dampf-

cylinder; der Kolben B wirkt durch die Kolbenstange C und die Pleuelstange P auf die Kurbel Q. Die Welle mit dem Schwungrad X ist auf der gußeisernen Fundamentplatte F gelagert; d und e sind die Dampfkanäle, die mit dem Schieberkasten k in Verbindung stehen; von dem Hohlraum g geht der Dampfauslaß r aus; die Steuerung geschieht in der früher beschriebenen Weise durch das Excenter f mit Schieberstange s; mittels konischer Zahnräder wird von der Welle die Achse a des Regulators V in Rotation versetzt und von der beweglichen Hülse h derselben aus wird je nach dem größeren oder kleineren Ausschlage der Schwungkugeln durch die Stange b die Drosselklappe c in dem Dampfzuleitungsrohr z beeinflußt. Von dem verlängerten Kreuzkopfzapfen (Verbindung der Kolbenstange mit Pleuelstange) wird der Plunger der Speisepumpe O betrieben.

Schließlich sei noch an der Abb. 945 eine moderne liegende Receiver-Verbundmaschine mit zweifacher Expansion beschrieben; die Abbildung stellt den Grundriß, teils als Horizontalschnitt, teils als obere Ansicht der Maschine dar. Der frische Kesseldampf wird durch die Dampfleitung K mit Absperrventil P dem Hochdruckcylinder A zugeführt; wenn er hier unter teilweiser Expansion gewirkt hat, gelangt er in den Receiver B und aus

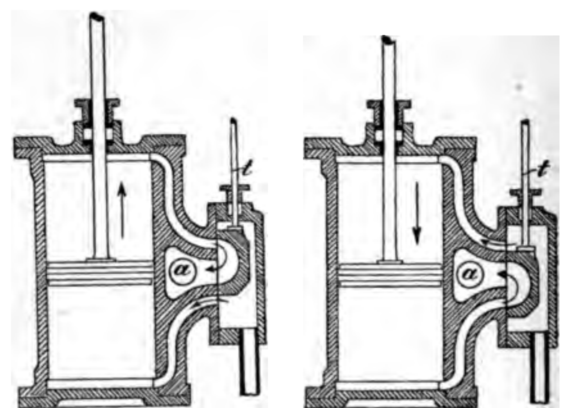


945. Liegende Receiver-Verbundmaschine.

diesem in den Niederdruckcylinder C. Nachdem er hier weiter expandiert hat, wird er in dem Kondensator D durch Einspritzwasser niedergeschlagen; letzteres mit dem Kondensationswasser und der Luft wird durch die Luftpumpen E abgesaugt. Der Hochdruckcylinder ist mit einer Ventilsteuerung, der Niederdruckcylinder mit Meyerscher Schiebersteuerung versehen; der Füllungsgrad des ersteren wird je nach der Arbeitsbeanspruchung vom Regulator selbstthätig reguliert, während die Steuerung des Niederdruckcylinders von der Hand eingestellt wird. Beide Cylinder sind mit cylindrischen Gleitführungen versehen, und mit diesen direkt zusammengegossen sind die sogenannten Bajonettbalken L, auf welchen die Lager der Schwungradwelle befestigt sind. Die beiden Kurbeln G sind um 90° gegeneinander verstellt, so daß ein Kolben stets in der mittleren Stellung sich befindet, wenn der andere im toten Punkt ist. Das Schwungrad ist als Seilscheibe ausgebildet, welches durch 12 Hanfseile die Arbeit überträgt. Die Maschine ist so eingerichtet, daß auch jeder Cylinder einzeln für sich arbeiten kann. Hierzu dienen die Rohrstücke O und N; für gewöhnlichen Verbundbetrieb sind dieselben ausgeschaltet und die Anschlußflanschen durch Blindscheiben geschlossen. Durch das Rohr O kann frischer Kesseldampf direkt in den Receiver und von hier in den großen Cylinder gelangen, wenn dieser mit Hochdruck arbeiten soll; oder anderseits kann durch das Rohr N der Receiver direkt mit dem Kondensator in Verbindung gesetzt werden, wenn der Niederdruckcylinder ausgeschaltet werden soll.

Einzelteile der Dampfmaschinen.

Von größter Wichtigkeit ist für jede Dampfmaschine selbstverständlich die genaue Dichtung des Kolbens gegen die Cylinderwandung, damit kein Dampf zwischen beiden hindurch gehen kann. Hierzu ist in erster Linie erforderlich, daß der Kolben am Umfang genau cylindrisch und glatt und ebenso der Cylinder in seiner ganzen Länge auf genau denselben Durchmesser ausgebohrt ist. Für kleinere und besonders schnelllaufende Maschinen genügt es, wenn auf diese Weise der Kolben genau in den Cylinder hineinpaßt, so daß er sich mit leichter Reibung dicht bewegt. Meist aber wendet man besondere Dichtungsmittel an; bei Niederdruckmaschinen kann man die Dichtung oder Packung dadurch bewirken, daß man dem Kolben eine feste Umwickelung von fettdurchtränkten Hanfzöpfen gibt, doch ist dieses primitive Mittel nicht zu empfehlen und besonders für die mit höherer Dampfspannung und deshalb höherer Temperatur arbeitenden Maschinen nicht anwendbar. Bei diesen muß vielmehr die Metallliderung angewendet werden. Bei dieser ist jede weiche Packung vermieden, es geht Metall auf Metall; man hat verschiedene Kolbenkonstruktionen dieser Art; bei einer besteht z. B. der Kolben aus einer Anzahl einzelner Stücke, welche zusammen wie ein einziger Ring aussehen und durch im Innern gelegene Federn nach außen an die Cylinderwand gedrückt werden. Vielfach werden auch Kolben angewendet, die am Umfang flache ringförmige Nuten haben, in welche elastische Metallringe eingelegt werden, die in ungespanntem Zustande einen etwas größeren Durchmesser als der Cylinder haben, sich also, wenn sie in die Nuten eingelegt und so zusammengedrückt sind, daß der Kolben in den Cylinder hineingeht, dicht an die Cylinderwand anlegen.



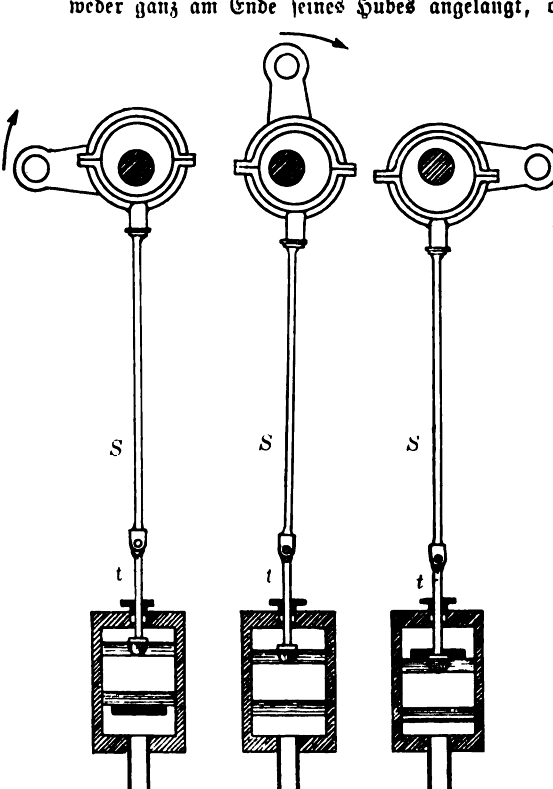
946 u. 947.
Schieberstellungen beim Auf- und Abgange des Kolbens.

Die Steuerungen sind nächst dem Cylinder und Kolben das wichtigste Organ der Dampfmaschinen, und gerade auf dem Gebiete der Steuerungen sind in den letzten drei Jahrzehnten die meisten neuen Konstruktionen erfunden worden. Es gibt jetzt eine große, kaum zu übersehende Zahl verschiedenartiger Dampfmaschinensteuerungen, und es würde zu weit führen, auch nur die wichtigsten derselben hier näher zu besprechen. Bei den neueren Steuerungen kann man einen Hauptunterschied machen zwischen Schiebersteuerungen und Ventilsteuerungen. Allgemein haben alle Steuerungen den Zweck, den Dampfeintritt und -austritt in bestimmter Weise zu regeln und zwar nicht nur in der Weise, daß, wie bei den allerersten Dampfmaschinen, abwechselnd beim Hin- und Hergange des Kolbens die Zuströmung und Ausströmung geöffnet und geschlossen wird, sondern auch so, daß in bestimmter Weise der Expansionsgrad beeinflußt wird. Am einfachsten in der Anordnung und Wirkung ist die gewöhnliche alte Schiebersteuerung, welche an den Abb. 946—950 kurz erläutert werden mag.

Der Cylinderraum (Abb. 946 und 947) steht durch zwei Kanäle, von denen je einer ganz an beiden Enden des Cylinders einmündet, mit der Schieberkammer in Verbindung; letztere erhält durch ein Rohr (in den Abbildungen von unten) den Kesseldampf zugeleitet. An den Kanälen vorbei bewegt sich der muschelförmige Schieber, und je nach seiner Stellung wird die Dampfeinströmung nach der einen oder der anderen Seite des Cylinders freigelegt, während der andere Kanal gegen den Schieberkasten geschlossen, dafür aber in Verbindung mit der Dampfausströmungsöffnung a gesetzt ist. In der ersten Abbildung strömt der Dampf, wie der Pfeil anzeigt, unter den Kolben; dieser bewegt sich also nach oben, und der verdrängte Dampf über dem Kolben strömt durch den geöffneten Auslaß ab, bei Auspuffmaschinen in die Luft, oder bei Kondensationsmaschinen nach dem Kondensator, oder bei dem kleinen

Cylinder von Verbundmaschinen nach dem großen Cylinder bezw. dem Receiver; in der zweiten Abbildung findet die umgekehrte Stellung statt.

Die Hin- und Herbewegung des Schiebers geschieht mittels der Schieberstange s (siehe Abb. 948—950), welche in dem Stück t durch eine Stopfbüchse dampfdicht in den Schieberkasten hineingeführt ist, durch ein Excenter von der Kurbelwelle aus. Das Excenter ist eine kreisrunde Scheibe, die excentrisch auf der Welle befestigt ist; dieselbe ist von einem Ring umgeben, der mit der Schieberstange fest verbunden ist und in dem sich die Scheibe drehen kann. Bei Drehung der Kurbelwelle dreht sich die Excenterscheibe mit, der Ring kann aber die Drehung nicht mitmachen, und so schiebt die Scheibe letzteren mit der Schieberstange bei jeder Kurbelumdrehung im Takte des Kolbens einmal hin und her. Die Abb. 948, 949, 950 zeigen drei aufeinanderfolgende Stellungen bei einer halben Umdrehung. Die erste entspricht der Abb. 946; der untere Kanal ist vom Schieber geöffnet, der Kolben geht nach oben. Bei der mittleren Stellung (Abb. 949) ist die Dampfzuströmung geschlossen, der Kolben ist entweder ganz am Ende seines Hubes angelangt, oder, bei Expansionsmaschinen, der Dampf im Cylinder arbeitet noch durch Expansion; am Ende des Kolbenhubes drückt das Excenter den Schieber hinab (Abb. 950), so daß der Dampf durch den oberen Kanal über den Kolben treten kann. Es ist leicht einzusehen, daß auf diese Weise eine regelmäßige Wechselwirkung des Dampfes auf den Kolben stattfinden muß.



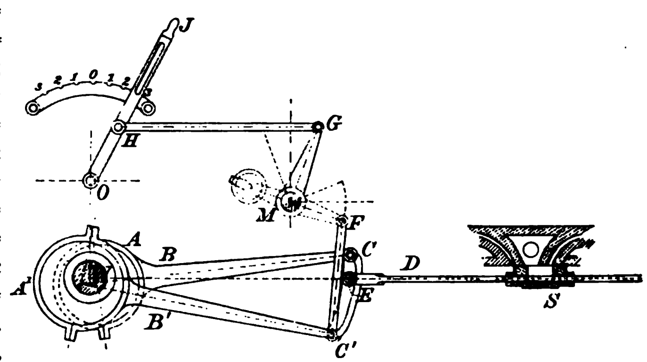
948—950.
Stellungen des Schiebers während einer halben Umdrehung.

Um bei Expansionsmaschinen den Dampfzutritt nicht während des ganzen Kolbenhubes stattfinden zu lassen, sondern nach einem bestimmten Bruchteil des Kolbenweges abzusperren, werden die Auflageplatten des Schiebers so vergrößert, daß der Einströmungskanal schon abgesperrt ist, wenn der Kolben und der Schieber erst einen Teil ihres Hubes vollendet haben; der bis dahin in den Cylinder eingetretene Dampf muß dann also für den Rest des Hubes durch Expansion wirken.

In manchen Fällen ist es notwendig, die Drehungsrichtung der Maschine umkehren, die Maschine „umsteuern" zu können, z. B. bei Lokomotiven, Dampfwinden, Fördermaschinen, Walzenzugmaschinen. Hierzu dienen die Umsteuerungen. Eine schon ältere, aber immer noch sehr viel angewandte, einfache und sinnreiche Konstruktion ist die Stephensonsche Kulissensteuerung, deren Anordnung Abb. 951 zeigt. Statt eines Excenters sitzen deren zwei auf der Welle W, das Vorwärtsexcenter A und das Rückwärtsexcenter A'. Ihre Excenterstangen B und B' sind an den Enden durch Bolzen mit der gekrümmten „Kulisse" C C' verbunden; in der Kulisse kann sich ein mit der Schieberstange D scharnierartig verbundenes Gleitstück, der sogenannte Kulissenstein E verschieben, wenn die Kulisse durch das um den festen Drehpunkt M bewegliche Hebelgestänge C'FMGH mittels des Hebels O J gehoben oder gesenkt wird; der Stein kann dieser Bewegung nicht folgen, da er durch eine Führung der Stange D sich nur geradlinig vorwärts und rückwärts bewegen kann. Je nachdem nun die Kulisse tief oder hoch steht, wird die Schieberstange von der einen oder anderen Excenterstange bewegt, läuft also auch die Maschine in dem Sinne, der der Stellung des betreffenden Excenters entspricht. Beim Heben der Kulisse aus der gezeichneten, annähernd tiefsten Stellung in die höchste wird die Schieberstange um die Größe der Excenterbewegung zurückgezogen, da A' B' C' an die Stelle von A B C

tritt. Der Schieber S wird also die entgegengesetzte Stellung einnehmen und der Kolben umgekehrt bewegt. Das Zahnsegment K dient dazu, den Steuerungshebel in jeder Lage feststellen zu können.

Um der Schieberbewegung bei jedem Hube gewisse Beschleunigungen und Verzögerungen zu dem Zwecke zu erteilen, das Öffnen und Schließen der Dampfkanäle schneller zu bewirken, gibt man der Excenterscheibe andere Formen, als die runde; man nimmt dann die sogenannten unrunden Scheiben, und durch die Form derselben und des zugehörigen Ringes kann man die verschiedenartigsten Schieberbewegungen hervorrufen. Mittels eines einfachen Schiebers läßt sich indessen die Expansion nicht in jedem beliebigen Maße zur Anwendung bringen, da bei einem starken „Voreilen" des Schiebers — welches durch entsprechendes Aufsetzen der Excenterscheibe derart bewirkt wird, daß die Schieberstange der Kolbenbewegung um ein gewisses Maß vorauseilt, so daß sie eher als letztere ihren Hubwechsel hat — zwar die Dampfeinströmung frühzeitig geschlossen wird, anderseits aber auch die Dampfausströmung für die andere Seite nicht bis zum Schlusse des Kolbenhubes offen bleibt, wodurch ein schädlicher Gegendruck auf der anderen Kolbenseite entsteht. Für Dampfmaschinen, die mit höheren Expansionsgraden arbeiten sollen, wendet man deshalb Doppelschieber an, d. h. zwei aufeinander arbeitende Schieber, von denen der zweite, der eigentliche Expansionsschieber, auf dem Rücken des sogenannten Grundschiebers gleitet, und den Dampfzufluß zu dem Hauptschieber reguliert und periodisch ganz absperrt; jeder Schieber wird durch eine Schubstange von einem besonderen Excenter getrieben. Diese Anordnung ist in ihrer Konstruktion und Wirksamkeit viel komplizierter, als die beschriebene einfache Schiebersteuerung, aber sie ist wegen ihrer Vorzüge seit längerer Zeit allgemein eingeführt. Sie wird nach ihrem Erfinder, der sie 1842 zuerst anwendete, Meyersche Steuerung genannt.



951. Stephensonsche Kulissensteuerung.

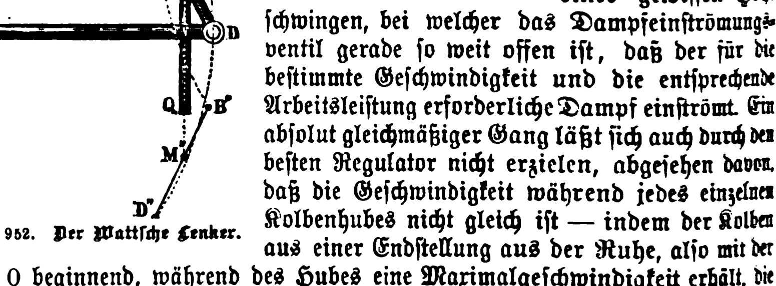
Andere Einrichtungen bezwecken ferner, die Expansion während des Ganges der Maschine mit der Hand verändern zu können; wenn z. B. der Kraftbedarf geringer wird, so ist es vorteilhafter, die Expansion zu vergrößern, also weniger Dampf mit voller Admissionsspannung einzulassen, als den Dampfzufluß zu drosseln. In neuerer Zeit hat man auch die Steuerungen so konstruiert, daß sie vom Regulator beeinflußt werden, so daß also letzterer selbstthätig die Expansion reguliert.

Statt der beschriebenen Schieber mit ebenen Gleitflächen hat man auch zuweilen Kolbenschieber, welche in ähnlicher Weise die Dampfverteilung bewirken, wie Flachschieber. Den Schieberkasten vertritt ein Hohlcylinder, und der Schieber besteht aus zwei darin schließenden hohlen Kolben mit Öffnungen, die sich vor den Mündungen der beiden Dampfkanäle vorbeibewegen und je nach der Lage der Löcher zu den Kanälen die Dampfzuströmung öffnen oder schließen.

Etwa seit Anfang der siebenziger Jahre trat ein bedeutsamer Umschwung der Konstruktion der Dampfmaschinensteuerungen ein; man erkannte, daß die einfache hin- und hergehende Bewegung des alten Wattschen Schiebers, sowie auch die späteren verbesserten Schiebersteuerungen nicht geeignet sei, den Dampfabschluß schnell und scharf abzuschließen, um die Admissionsperiode auf einen genau bestimmten Teil des Hubes mit voller Einströmung zu beschränken und von einem genau zu bestimmenden Punkte ab mit sofort ganz geschlossenem Zufluß die reine Expansion beginnen zu lassen. Mit der Wirkungsweise des von einem Excenter oder auf ähnliche Weise bewegten Schiebers ist es verbunden, daß er mehr oder weniger schnell successive schließt und öffnet, da er sich ja von einer Seite über die Weite des Kanals fortschieben muß. Man ging deshalb zu den sogenannten Präzisionssteuerungen über, welche zuerst von dem Amerikaner Corliß

erfunden wurden und daher auch allgemein mit dem Namen Corlißsteuerungen bezeichnet wurden; die erste Ventilsteuerung von Corliß fand sehr zahlreiche Nachahmungen, unter diesen manche gute neue, aber auch viele zu komplizierte und deshalb verfehlte Konstruktionen; in Deutschland allein sind über 500 Patente auf solche Steuerungen erteilt worden. In den letzten Jahren ist indessen schon wieder eine Rückkehr zu einfacheren Steuerungsvorrichtungen erkennbar. Bei den Präzisionssteuerungen kann das Dampfabschlußorgan ein Ventil, Hahn oder ein Schieber sein, meistens sind es Ventilsteuerungen; allen gemeinsam ist das Grundprinzip, daß in dem Moment, wo der Dampfabschluß erfolgen soll, das Abschlußorgan durch eine plötzlich ausgelöste Kraft, meist durch eine Feder, die jedesmal vorher durch eine Hebelübertragung von der Maschine selbst gespannt wird, sehr schnell und präzise den Abschluß bewirkt. Auf dem Kontinent haben, wie schon früher kurz erwähnt, besonders die Gebrüder Sulzer zu Winterthur (Schweiz) mit ihren Präzisionssteuerungen bahnbrechend gewirkt.

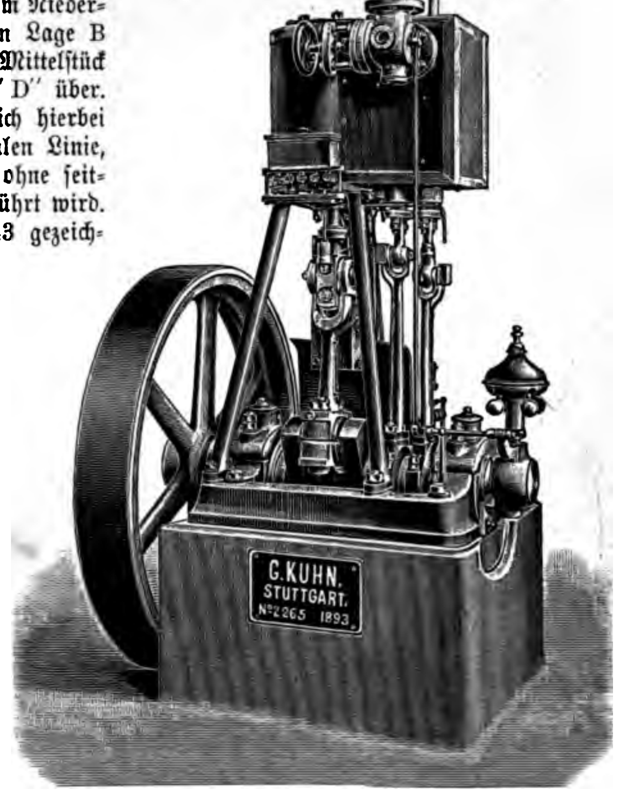
Ein weiterer wichtiger Maschinenteil ist der **Regulator**, dessen Wirkungsprinzip die Zentrifugalkraft ist. Bei Erhöhung der Umdrehungszahl der Maschine werden durch die wachsende Zentrifugalkraft zwei Schwungkugeln gehoben, wodurch mittels Hebelübertragung das Drosselventil mehr geschlossen und so die Dampfzuströmung verringert wird, und umgekehrt. Für eine gewisse normale Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine, für welche der Regulator konstruiert oder eingestellt wird, stellt sich ein Gleichgewichtszustand derart ein, daß die Kugeln des Regulators in einer gewissen Höhe schwingen, bei welcher das Dampfeinströmungsventil gerade so weit offen ist, daß der für die bestimmte Geschwindigkeit und die entsprechende Arbeitsleistung erforderliche Dampf einströmt. Ein absolut gleichmäßiger Gang läßt sich auch durch den besten Regulator nicht erzielen, abgesehen davon, daß die Geschwindigkeit während jedes einzelnen Kolbenhubes nicht gleich ist — indem der Kolben aus einer Endstellung aus der Ruhe, also mit der Geschwindigkeit 0 beginnend, während des Hubes eine Maximalgeschwindigkeit erhält, die sich gegen Ende des Hubes wieder auf 0 verringert — welche Schwankungen durch die lebendige Kraft des Schwungrades ausgeglichen werden, muß eine Vergrößerung oder Verringerung der Umdrehungsgeschwindigkeit ein gewisses Maß erreichen, ehe der Regulator anfangen kann zu wirken, indem die Zunahme oder Abnahme der Zentrifugalkraft eine gewisse Größe haben muß, um die Widerstände beim Verstellen des Drosselventils zu überwinden. Die Gleichmäßigkeit des Ganges der Maschine hängt also — abgesehen von anderen Umständen — von der „Empfindlichkeit“ und der „Verstellungskraft“ des Regulators ab, und man drückt erstere durch Prozente aus; „ein Regulator besitzt eine Empfindlichkeit von 3%“ heißt, bei einer Änderung der Umdrehungszahl der Maschine um 3% fängt der Regulator an zu wirken, oder, der Regulator hält die Geschwindigkeit der Maschine innerhalb der Grenze von 3% Verschiedenheit konstant. Übermäßig empfindliche Regulatoren sind nicht zu gebrauchen, denn solche würden gar nicht zur Ruhe kommen, fortwährend das Dampfventil bewegen oder unter Umständen (bei sogenannten ganz astatischen Regulatoren) stets zwischen der höchsten und tiefsten Lage schwanken, also das Drosselventil ununterbrochen ganz öffnen oder ganz schließen.



952. Der Wattsche Lenker.

Weiter ist von den wichtigeren Einzelheiten der Dampfmaschinen noch zu nennen bei den Wattschen Maschinen sowie auch den späteren Balanciermaschinen die Geradführung oder das Wattsche Parallelogramm. Dasselbe hat den Zweck, den seit-

lichen Ausschlag, den das Balancierende, an dem die Kolbenstange angreift, bei Auf- und Abgehen macht, auszugleichen, so daß die Kolbenstange und auch die benachbarte Luftpumpenstange genau geradlinig vertikal geführt werden. Die Konstruktion und Wirkungsweise sei an der Abb. 952 erklärt. BC und OD sind zwei Hebelarme, die sich um die Zapfen C und O auf und ab bewegen; OC stellt hierbei die eine Hälfte des Balanciers vor, während der Hebel OD ein Hilfsglied ist, welches bei O irgend am Maschinengestell festgelagert ist. B und D sind durch eine in Zapfen drehbare Stange verbunden, an deren Mitte M wieder mit Zapfen die Kolbenstange QM angreift. Die Abbildung zeigt die Mittellage. Hebt sich nun der Balancierarm, bis B in die höchste Lage B′ kommt, so kommt D, gleichzeitig um ein entsprechendes Bogenstück in die Höhe schwingend, nach D′; das Verbindungsstück geht hierbei in die Lage B′ D′ über; beim Niedergehen kommt in der untersten Lage B nach B″ und D noch D″; das Mittelstück geht hierbei in die Stellung B″ D″ über. Der Mittelpunkt M bewegt sich hierbei stets in einer geraden vertikalen Linie, so daß auch die Kolbenstange ohne seitliche Abweichungen gerade geführt wird. Die in der früheren Abb. 943 gezeichnete Geradführung weicht zwar in der Anordnung von der vorstehenden Skizze etwas ab, beruht aber, wie leicht erkenntlich, auf demselben Gedanken.



958. Stehende kleinere Eincylinder-Hochdruckmaschine mit Schiebersteuerung von G. Kuhn.

Einteilung der Dampfmaschinen.

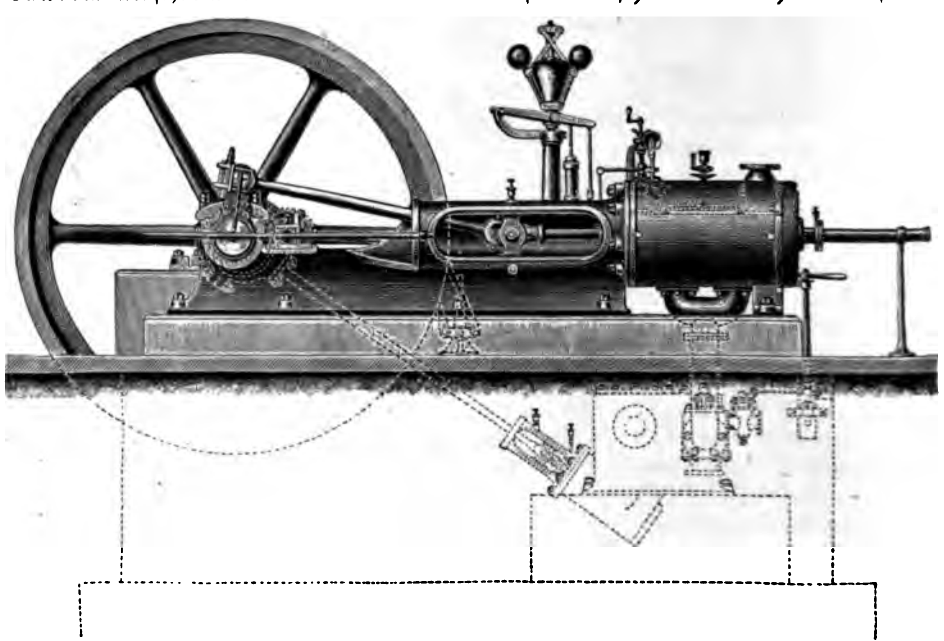
Schon aus den bisherigen Ausführungen lassen sich die verschiedenen Hauptsysteme der Dampfmaschinen entnehmen. Abgesehen von den ersten atmosphärischen Maschinen, bei denen mit geringerer als atmosphärischer Spannung gearbeitet wurde, der Dampf also nur durch Kondensation wirkt und der atmosphärische Luftdruck die Arbeit bewirkt, kann man je nach dem Gesichtspunkt hauptsächlich unterscheiden: einfach- und doppeltwirkende Dampfmaschinen, je nachdem der Dampf auf den Kolben nur in einer Richtung oder abwechselnd von beiden Seiten wirkt. Erstere sind seit längerer Zeit Ausnahmen; fast alle neueren Dampfmaschinen sind doppeltwirkende: Maschinen mit und ohne Expansion, je nachdem der Kesseldampf während des ganzen Kolbenhubes oder nur während eines Teiles desselben einströmt und während des Restes des Hubes nur durch Expandierung wirkt. Erstere werden nur noch selten für ganz kleine Leistungen wegen der einfacheren Steuerung angewendet. Maschinen ohne und mit Kondensation oder Auspuff- und Kondensationsdampfmaschinen; bei ersteren entweicht der Dampf nach seiner Arbeitsleistung in die Luft (oder er wird noch zur Heizung von Räumen oder zum Erwärmen von Wasser u. s. w. benutzt), bei letzteren wird er durch Abkühlung in einem besonderen Kondensator niedergeschlagen. Größere Dampfmaschinen werden meist, Mehrfach-Expansionsmaschinen stets wegen der besseren Dampfökonomie als Kondensations-



954. Tandem- (oder Woolf-) Maschine mit Ventilsteuerung und mit hintereinanderliegenden Cylindern. (Gebrüder Sulzer in Winterthur.)

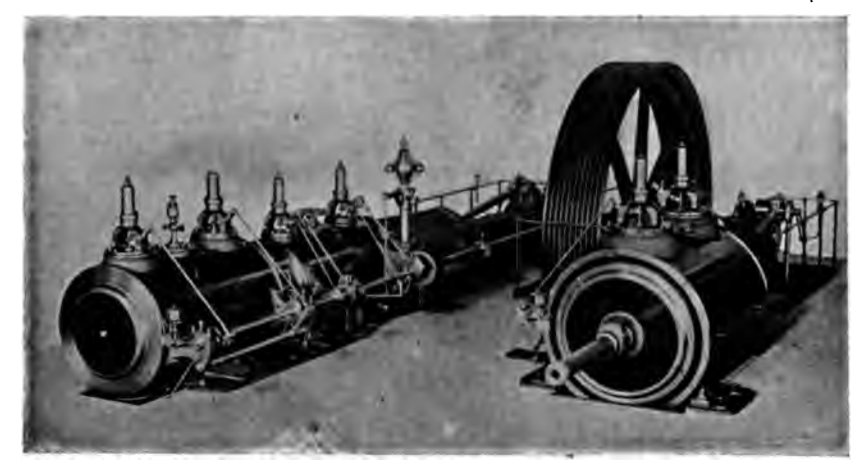
maschinen konstruiert. Bei kleineren Maschinen dagegen wird dieser Vorteil durch höhere Herstellungskosten, kompliziertere Konstruktion und schwierigere Bedienung aufgehoben.

Ferner **Eincylindermaschinen**, **Zwillingsmaschinen**, **Woolfsche Maschinen**, **Tandem-Maschinen** und **Verbund- oder Compoundmaschinen**. Eincylindermaschinen

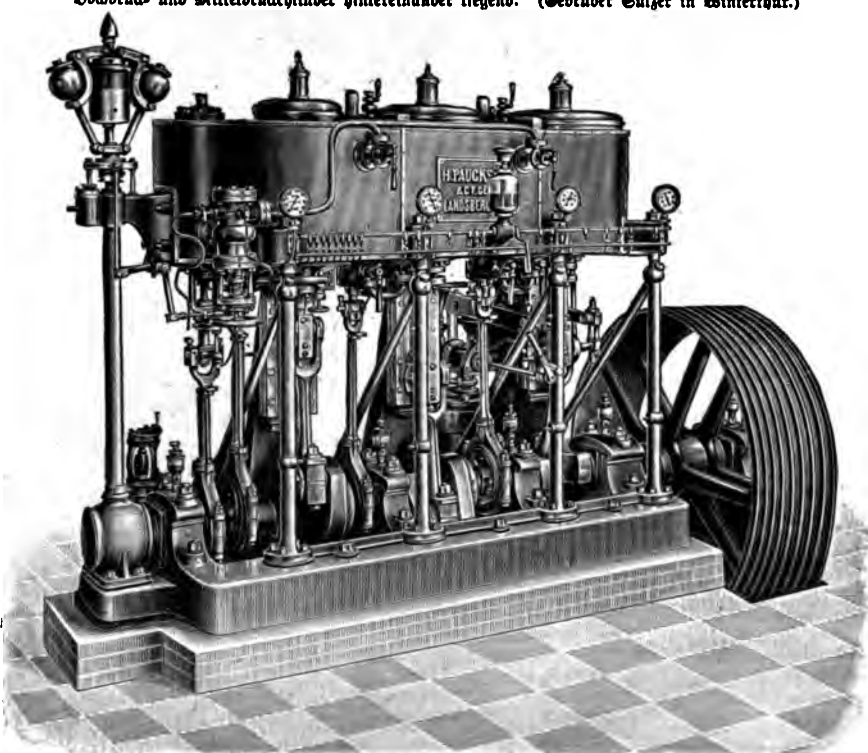


955. Liegende Eincylindermaschine für mittlere und große Leistungen (70—500 P. S.) mit Präzisions-Schiebersteuerung und Kondensation.
Kondensator und Luftpumpe liegen im Keller (punktiert); letztere wird durch ein Excenter von der Kurbelwelle aus betrieben. (G. Kuhn in Stuttgart-Berg.)

sowie Zwillingsmaschinen können Auspuff- oder Kondensationsmaschinen sein; Zwillingsmaschinen haben zwei selbständige Cylinder, welche beide mit direktem Kesseldampfe arbeiten, und deren Kolben auf eine gemeinschaftliche Schwungradwelle wirken. Die Kurbeln sind unter 90° gegeneinander verstellt, so daß der eine Kolben sich gerade in der Mitte des Hubes befindet, also seine volle Kraftwirkung ausübt, wenn der andere sich in der Endlage, dem „toten Punkte“ befindet. Hierdurch haben sie gegen Eincylinder-



956. Liegende Dreifachexpansions- (Tripleverbund-) Maschine mit Ventilsteuerung. Hochdruck- und Mitteldruckcylinder hintereinander liegend. (Gebrüder Sulzer in Winterthur.)



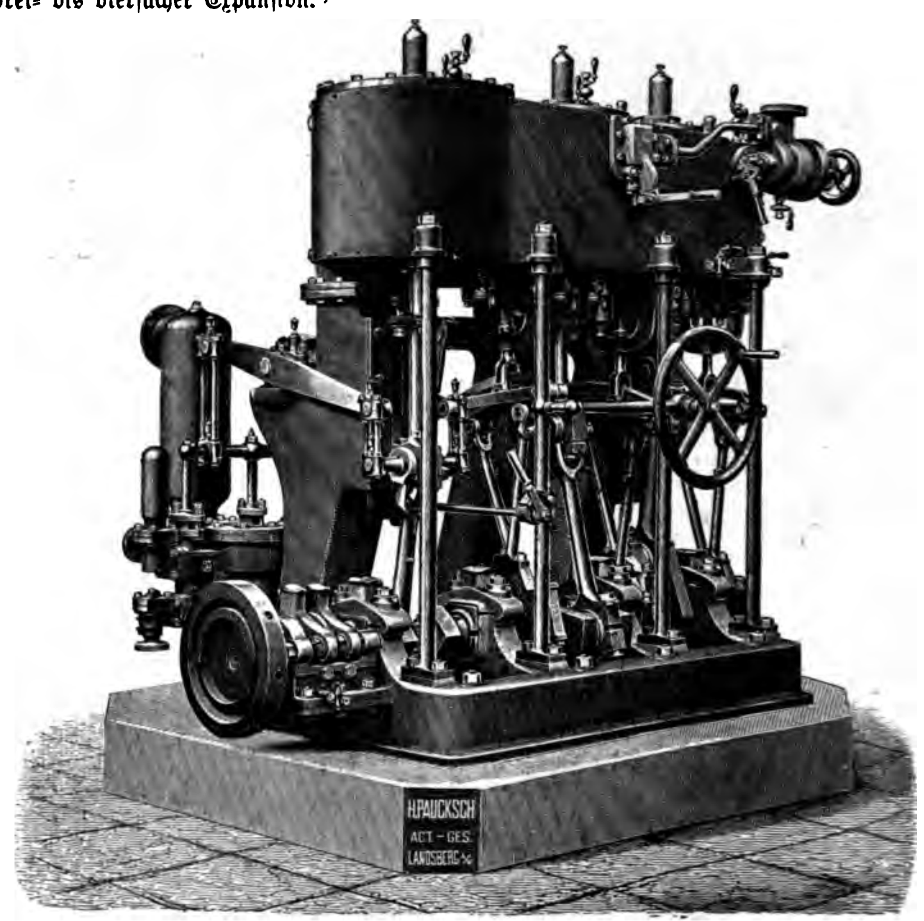
957. Stehende Dreifachexpansions- (Tripleverbund-) Dampfmaschine für mittlere und große Leistungen (45—100 P. S.) mit Einspritzkondensation und Schiebersteuerung.

Der Ständer des Niederdruckcylinders (links) ist als Kondensator ausgebildet; an demselben ist auch die Luftpumpe angebracht, deren Kolben durch einen kleinen Balancier von der Niederdruck-Kolbenstange aus betrieben wird. (Akt.-Gesellschaft H. Paucksch in Landsberg a. W.)

maschinen den Vorteil gleichmäßigeren Ganges, und daß sie aus jeder Lage direkt angelassen werden können, während letztere, wenn sie sich gerade in der Lage befinden, daß beide Dampfeinströmungen geschlossen sind, erst angedreht werden müssen. Man kann Zwillingsmaschinen auch so konstruieren, daß jeder Cylinder allein arbeiten kann. Bei geringem Kraftbedarf, oder wenn an der einen Hälfte der Maschine eine Reparatur zu bewirken ist, kann ein Cylinder durch Abkuppeln der Kolbenstange ausgeschaltet werden.

Zweifachexpansionsmaschinen Woolfschen Systems haben entweder übereinanderstehende Cylinder — ursprünglich Woolfsche Maschinen — oder horizontale hintereinanderliegende Cylinder; letztere Anordnung bezeichnet man als Tandemmaschinen.

Über die Mehrfachexpansions- oder Verbunddampfmaschinen ist schon früher gesagt worden, daß sie für größere und sehr große Leistungen, besonders bei hoher Dampfspannung der besseren Dampfausnutzung wegen angewendet werden und zwar mit zwei-, drei- bis vierfacher Expansion.



958. **Dreifachexpansions-Schraubenschiffsmaschine mit Einspritzkondensation und Kolbensteuerung.**

Der Ständer des Niederdruckcylinders (links) ist als Kondensator ausgebildet; die hinter demselben stehende Luftpumpe wird durch einen Balancier von der Kolbenstange des Niederdruckcylinders betrieben. Bei großen Maschinen wird meist statt der Einspritzkondensation Oberflächenkondensation angewandt. Leistung bis 1500 P. S.

Nach der Anordnung der Aufstellung, der Bauart und der Arbeitsübertragung sind noch zu unterscheiden stehende und liegende Maschinen, Wanddampfmaschinen, Maschinen mit Rotation (Kurbelwelle), Balanciermaschinen sowie schließlich die Dampfmaschinen mit oscillierendem Cylinder.

Für besondere Verwendungszwecke sind ganz besondere Typen von Dampfmaschinen ausgebildet worden, z. B. die Schiffsmaschinen, Lokomotiven, Lokomobilen, schnellaufende Maschinen zum Betriebe von Elektrodynamomaschinen, Maschinen mit verstellbaren Hubpausen (Kataraktsteuerung) besonders für die Wasserhaltung in Bergwerken, die Dampfhämmer, Dampframmen.

In den Abb. 953—958 sind einige Dampfmaschinen der wichtigsten Systeme dargestellt.

Die Verwendung überhitzten Wasserdampfes und die Schmidtsche Heißdampfmaschine.

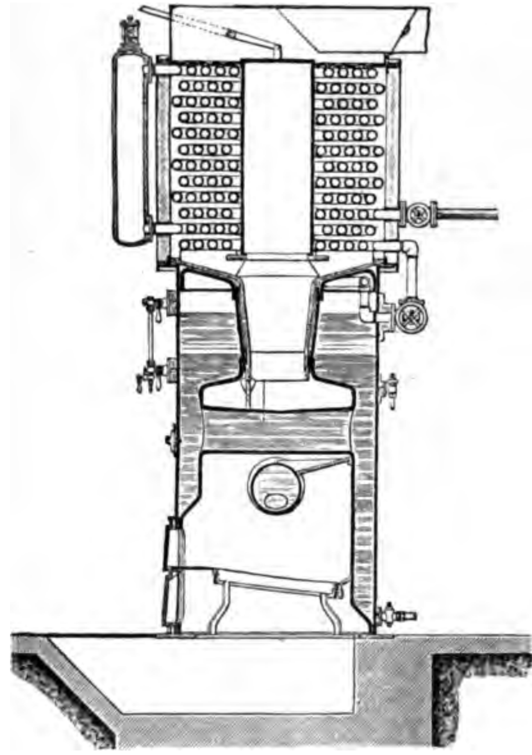
Wir hatten bei der Besprechung des Wirkungsprinzips der Dampfmaschinen kurz angedeutet, daß in neuerer Zeit in der Überhitzung des Wasserdampfes ein Mittel gefunden worden sei, den Wirkungsgrad der Dampfmaschinen zu erhöhen; mit diesem Gegenstande haben wir uns noch etwas näher zu befassen.

Aller Wasserdampf, der in gewöhnlichen Dampfkesseln erzeugt und zum Betriebe der Dampfmaschinen benutzt wird, ist kein eigentlich trockener, thatsächlich rein gasförmiger Dampf, sondern gesättigter, nasser Dampf, denn im Kessel befindet er sich genau auf dem Sättigungspunkte; im gewöhnlichen Leben nennt man ihn allerdings trockenen Dampf, wenn er nicht Wasserbläschen mechanisch suspendiert mit sich führt. Sobald gewöhnlicher Kesseldampf sich abkühlt, was ja in der Dampfleitung nicht ganz zu verhindern ist, besonders da er wegen seines Feuchtigkeitsgehaltes ein guter Wärmeleiter ist, kondensiert ein Teil desselben. Die theoretisch begründete Thatsache, daß die Dampffeuchtigkeit den Verbrauch der Maschine in hohem Grade ungünstig beeinflußt, hat sich in der Praxis vollauf bestätigt. Wenn mehrere Maschinen gleicher Konstruktion und Größe und gleich guter Ausführung an verschiedenen Stellen sehr verschiedenen Dampfverbrauch aufweisen, wie dies häufig genug vorkommt, dann liegt der Grund hierzu meist nur in der Beschaffenheit des Dampfes. Man hat sich schon seit längerer Zeit vielfach bemüht, den Maschinen wirklich trockenen Dampf zuzuführen durch Verwendung von Dampftrocknern und Wasserabscheidern, die aber den gewünschten Zweck nur teilweise erfüllen konnten. Wird dagegen der Dampf höher erhitzt, als seinem Drucke für den Sättigungspunkt entspricht, dann verhält er sich wesentlich anders; der überhitzte, trockene, also rein gasförmige Wasserdampf ist, wie alle Gase, ein schlechter Wärmeleiter, gibt also seine Wärme nicht so schnell an die Rohr- und Cylinderwände ab und kann nach dem Grade seiner Überhitzung eine gewisse Abkühlung erleiden, ohne sich niederzuschlagen. Hierin liegt schon ein Vorteil für den Maschinenbetrieb. Aber der Nutzen aus der Verwendung überhitzten Wasserdampfes ist aus anderen Gründen noch höher. Durch die Überhitzung wird dem Dampfe, ohne dessen Spannung zu erhöhen, eine gewisse Wärmemenge über die Grenze hinaus zugeführt, welche von der Natur dem gesättigten Dampfe gezogen ist und welche in der Dampfmaschine als Arbeit wieder gewonnen werden kann und zwar in vorteilhafter Weise, da nicht, wie bei der ursprünglichen Erzeugung des Wasserdampfes, ein großer Teil der Wärme als latente Wärme für die Ausnutzung verloren geht. Wenn bei der Expansion des Dampfes im Cylinder zum Schluß noch eine geringe Überhitzung vorhanden ist, dann ist Kondensation und hiermit Dampfverlust ausgeschlossen.

In den letzten Jahren haben die Versuche, überhitzten Dampf zu erzeugen, und die Konstruktionen hierfür wieder einen größeren Umfang angenommen, nachdem schon längst durch zahlreiche Versuche festgestellt war, daß dadurch eine bedeutende Dampf- und damit Brennmaterial-Ersparnis zu erzielen ist. Der Gedanke, den im Kessel erzeugten gesättigten, häufig auch direkt nassen Dampf vor seinem Eintritt in die Dampfmaschine durch besondere Apparate in den Feuerzügen des Kessels oder im Fuchs mittels der Heizgase zu trocknen und zu überhitzen, ist nicht neu; die ersten Versuche in dieser Beziehung scheinen im Anfange der fünfziger Jahre in Amerika und bald darauf auch in Frankreich und England gemacht worden zu sein. Auf Schiffen haben solche Überhitzungsapparate schon in den sechziger Jahren sehr ausgedehnte Anwendung gefunden. Besonders hat seit 1855 in vortrefflicher, scharfsinniger Weise der bedeutende gelehrte Philosoph und Ingenieur Hirn zu Logelbach bei Kolmar (Elsaß), der gleichzeitig mit Robert Mayer und unabhängig von demselben das Prinzip von der Erhaltung der Kraft entwickelte, aber nach der Veröffentlichung Mayers sofort freiwillig auf den Entdeckerruhm verzichtete, und sich auch sonst durch hervorragende wissenschaftliche Forschungen und sehr wertvolle technische Arbeiten in hohem Maße ausgezeichnet hat, sehr eingehende und sorgfältige, langjährige wissenschaftliche Studien und praktische Versuche über die Vorteile der Dampfüberhitzung vorgenommen und veröffentlicht. Er erreichte Dampftemperaturen von 250°

bei 4 Atmosphären Kesselüberdruck, also eine Überhitzung von rund 100°. Seine Arbeiten hatten aber trotz des einwandfrei bewiesenen Nutzens und der auch schon erzielten Erfolge keinen größeren praktischen Erfolg, und sie gerieten später fast in Vergessenheit, und zwar einerseits wegen der damaligen Unvollkommenheit der Überhitzungsapparate, besonders aber, weil man noch keine Schmiermaterialien kannte, die bei sehr hohen Temperaturen brauchbar waren; außerdem wurde auch damals die Aufmerksamkeit durch andere bedeutende Fortschritte im Dampfmaschinenbau, besonders durch die Erhöhung der Dampfspannung und die Einführung der mehrfachen Expansion abgelenkt.

Seitdem hat man aber gelernt, bessere Überhitzungsapparate mit großer Widerstandsfähigkeit zu konstruieren und auch Mineralöle für sehr hohe Temperaturen herzustellen. Es blieb also jetzt hauptsächlich noch die praktische konstruktive Ausgestaltung der Idee zu lösen. Bis Anfang der neunziger Jahre suchte man die Vorteile der Überhitzung durch Überhitzungsapparate zu gewinnen, die man zwischen Dampferzeuger und Maschine einschaltete; man behielt also die alten Dampfkessel und Dampfmaschinen bei, und als solche Konstruktionen sind hauptsächlich die Überhitzungsapparate von Schwörer in Kolmar und Gehre in Düsseldorf zu nennen. Vor einigen Jahren hat dagegen der Zivilingenieur **Wilhelm Schmidt** in Aschersleben einen ganz neuen Dampfkessel speziell für die Erzeugung hoch überhitzten Wasserdampfes und ebenfalls eine Dampfmaschine für die Verwendung desselben konstruiert, welche nach der Ansicht hervorragender Fachmänner eine große Bedeutung für die weitere Entwickelung der Dampfmaschinen hat. Der Schwerpunkt der Erfindung liegt in der Konstruktion des Kessels, durch welchen ohne komplizierte Einrichtung Dampf von einer Temperatur von 350° C. erzeugt wird. Abb. 959 zeigt einen solchen **Heißdampfkessel** kleinerer und einfachster Art, wie sie in den ersten Jahren und bis etwa 1896 fast ausschließlich ausgeführt wurden, während jetzt auch liegende Kessel nach Schmidts System gebaut werden.



959. Schmidtscher Heißdampfkessel (Schnitt).

In seinem unteren Teile ist er ein Quersiederkessel mit Innenfeuerung; über demselben ist der Überhitzer angebracht. Derselbe besteht aus zwei spiralig gewundenen Rohrschlangen. Die unteren beiden Spiralen bilden den **Vorüberhitzer**, die darüber liegenden den **Hauptüberhitzer**. Erstere steht einerseits durch ein — rechts an der untersten Spirale sichtbares — Rohr mit dem Dampfraum des Kessels in Verbindung und ist mit dem anderen Ende — links bei der zweiten Spirale — an den Nachverdampfer, ein geschlossenes Gefäß, angeschlossen; der Hauptüberhitzer ist wieder mit dem obersten Ende seiner Spiralschlange oben mit diesem Nachverdampfer verbunden, während von dem unteren Ende die Dampfleitung nach der Maschine geht. Beide Spiralschlangen sind von einer gut isolierten Ummantelung umgeben. Die Heizgase streichen, nachdem sie die Quersieder des Unterkessels umspült haben, mit noch sehr hoher Temperatur (etwa 600° C.) zwischen den Spiralrohren durch nach oben. Der durch absichtlich starke Beanspruchung der Kesselheizfläche und wegen des kleinen Dampfraumes sehr nasse Dampf tritt zunächst in den Vorüberhitzer; in den der höchsten Temperatur der Heizgase ausgesetzten beiden Spiralen desselben wird das mit fortgerissene Wasser verdampft, der nasse Dampf getrocknet. Hierzu ist eine bedeutende Wärmemenge erforderlich, welche den Rohrwandungen entzogen wird, so daß die Röhren stetig gekühlt werden. Wenn durch zu starke Feuerung die Temperatur der Feuergase steigt, dann wird auch vom Dampfe mehr Wasser mit in den Vorüberhitzer gerissen, also auch mehr Wärme zu dessen Nach-

verdampfung verbraucht, so daß keine Gefahr für zu starke Erhitzung und baldige Zerstörung der Rohrspirale zu befürchten ist.

In dem Nachverdampfer, wo wegen des bedeutend größeren Querschnitts eine Verlangsamung der Dampfströmung eintritt, findet die völlige Verdampfung des in Gestalt feiner Wasserbläschen noch durch den Vorüberhitzer mitgerissenen Wassers statt. Der eintretende Dampf besteht aus einem Gemisch von schon überhitztem und noch nassem Dampfe; bei der schnellen Durchströmung durch die Spirale hat sich noch kein gleichmäßiger ganz trockener Dampf bilden können. Die überschüssige Wärme des ersteren wird nun im Nachverdampfer dazu verwendet, auch den Rest des nassen Dampfes oder des mitgerissenen Wassers ganz zu trocknen bezw. zu verdampfen. Hierdurch findet eine Temperaturabnahme von 30—80° C. im Nachverdampfer statt. In dem Hauptüberhitzer wird dann dieser schon trockene Dampf hoch überhitzt. Die Heizgase ziehen also zum Teil im Gleichstrom, zum Teil im Gegenstrom zu dem Dampf im Überhitzer; die unteren beiden Spiralen werden von den heißesten Gasen umspült. Da in demselben aber sehr nasser Dampf ist, der zur Trocknung viel Wärme aufnimmt, so werden die Röhren von innen energisch gekühlt; die Feuergase geben hier ihre Wärme von etwa 600—400° ab. Der mit etwa 200° in den Hauptüberhitzer tretende Dampf kommt auf seinem Wege nach unten in immer höherer Temperatur und wird immer höher, in der letzten Spirale bis auf 350° erhitzt, während anderseits den sich abkühlenden Heizgasen nach oben von dem weniger heißen Dampf so viel Wärme entzogen wird, daß sie schließlich nur mit der für den Schornsteinzug erforderlichen Temperatur von 200—250° C. entweichen. Die Ausnutzung der Wärme ist also eine sehr vollkommene, dabei ist doch jede komplizierte leicht zerstörbare Einrichtung vermieden.

Inmitten des Vorwärmers steigt ein senkrechtes, weites Rohr auf, welches oben mit einer Klappe versehen ist, die vom Heizerstande aus durch einen Zug zu bedienen ist; ist dieselbe offen, so steigen die Heizgase aus dem Unterkessel direkt, ohne die Spiralen zu bestreichen, in den Schornstein. Die Klappe wird beim Anheizen geöffnet, und im Betrieb kann durch Einstellen derselben das Maß der Überhitzung geregelt werden. Mit der Anordnung dieser Klappe ist der Übelstand verbunden, daß unzuverlässige Kesselwärter dieselbe häufig aus Bequemlichkeit gar nicht bedienen, sondern offen stehen lassen, so daß der Effekt des Überhitzers ganz verloren geht und nur die Heizfläche des Unterkessels wirksam ist, die Feuergase also mit geringer Ausnutzung in den Schornstein gehen. Dieser Übelstand ist neuerdings in der Weise beseitigt worden, daß man nach Bedarf ganz reines, aus einem Vorwärmer kommendes, kesselsteinfreies Speisewasser in den Überhitzer führt; hierdurch wird die Überhitzerheizfläche teilweise zur Kesselheizfläche, und man kann den Grad der Überhitzung durch die Menge des regelmäßig zugeführten Wassers in weiten Grenzen regulieren, ohne die Überhitzerklappe zu öffnen.

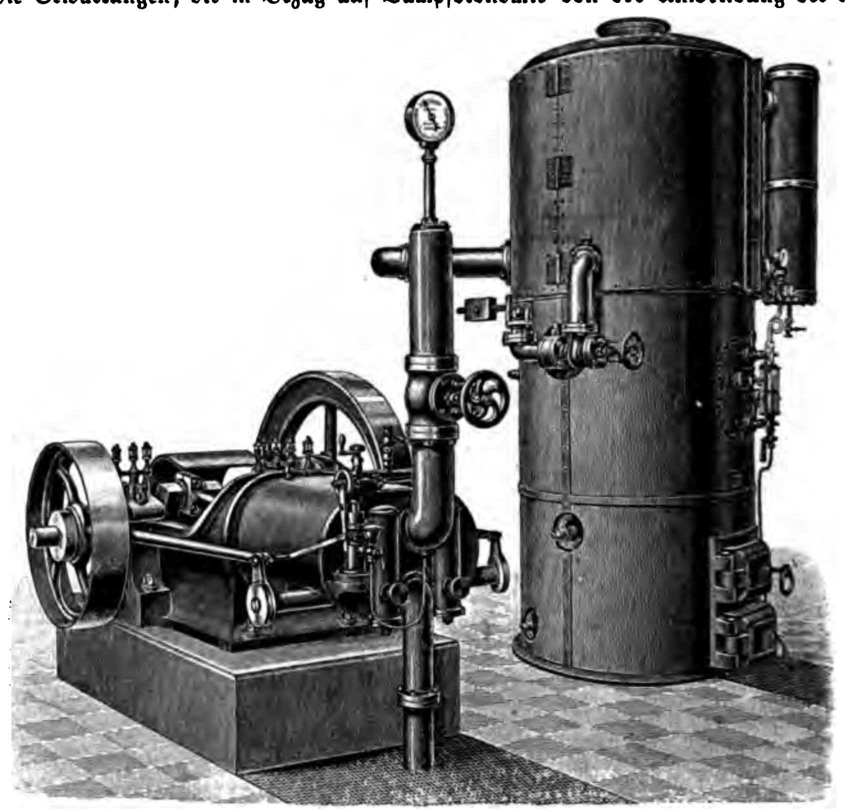
Die Heizfläche des Unterkessels kann nach obigem viel stärker beansprucht werden, als bei anderen Kesseln, da es ja nicht, wie bei diesen, darauf ankommt, von vornherein möglichst trockenen Dampf zu erzeugen; der ganze Kessel wird hierdurch für eine bestimmte Leistung kleiner.

Wo der Raum es gestattet, und besonders für größere Leistungen wird der Schmidt-Kessel in neuester Zeit meist liegend als Cornwallkessel ausgeführt, und er hat sich auch in dieser Form bewährt. Der Überhitzer liegt hinter dem eigentlichen Kessel eingemauert, und die Heizgase können, aus dem Flammrohre kommend, durch Schieberstellung entweder direkt in den Überhitzer, oder erst durch die äußeren Feuerzüge und dann erst in denselben geleitet werden; oder sie können bei teilweise geöffnetem Schieber teils den einen, teils den anderen Weg gehen, so daß der Heizer durch mehr oder geringeres Öffnen der Schieber den Überhitzer regulieren kann. Da Cornwallkessel an sich trockeneren Dampf liefern, so bleibt bei der liegenden Anordnung der Vorüberhitzer und der Nachverdampfer fort.

Für die Verwendung des überhitzten Wasserdampfes hat Schmidt Heißdampfmaschinen konstruiert, die ebenfalls gegenüber den üblichen Dampfmaschinen manche wichtige und interessante Neuerungen enthalten. Sie werden als stehende und liegende Maschinen ausgeführt und zwar als Hochdruck- und auch als Kondensations-Verbundmaschinen. Während das Triebwerk dem gebräuchlichen anderer Maschinen gleicht, sind die Arbeitsräume des Dampfes in ganz neuer origineller Art unter dem Gesichtspunkte angeordnet, daß die größte Ökonomie und die größte Betriebssicherheit vereinigt werden sollten. Die kleineren stehenden Eincylinder-Hochdruckmaschinen sind nach Art der Gasmotoren konstruiert: der Cylinder bleibt an einer Seite offen, wodurch Stopfbüchsendichtung vermieden wird; der Kolben kann direkt durch eine Pleuelstange, ohne Kreuzkopf und Geradführung auf die Kurbel arbeiten. Meist werden indes Tandemmaschinen mit einer ganz eigentümlichen Cylinderkonstruktion ausgeführt, deren nähere Beschreibung hier zu weit führen würde. Durch die Konstruktion sind Hochdruck- und Niederdruckcylinder und Receiver direkt ohne Zwischendeckel und ohne Stopfbüchse untereinander verbunden, und es arbeitet nur ein Kolben, der in beiden Cylindern verschiedene Durchmesser hat; es ist nur eine Kolbenstange vorhanden und nur eine Stopfbüchse, welche

nur gegen den sehr geringen Druck von etwa $^1/_2$ Atmosphäre abzudichten hat. Die gan Maschine arbeitet wie eine Dreicylindermaschine, und obwohl die Wirkung der einzeln Cylinder eine einfache ist, so ist doch die Gesamtwirkung auf die Welle eine doppelte u ähnlich, wie bei einem doppeltwirkenden Dampfcylinder.

Die Maschinen werden in den verschiedensten Größen, als liegende Zwilling tandem-Verbundmaschine bis zu 500 Pferdestärken gebaut. Die Maschinen sowohl u besonders auch die Überhitzer, bezüglich deren Haltbarkeit anfangs Zweifel gehegt wurde haben sich in der Praxis in mehrjährigem Betriebe bestens bewährt; ganz besonders habe sich die Erwartungen, die in Bezug auf Dampfökonomie von der Anwendung der Übe



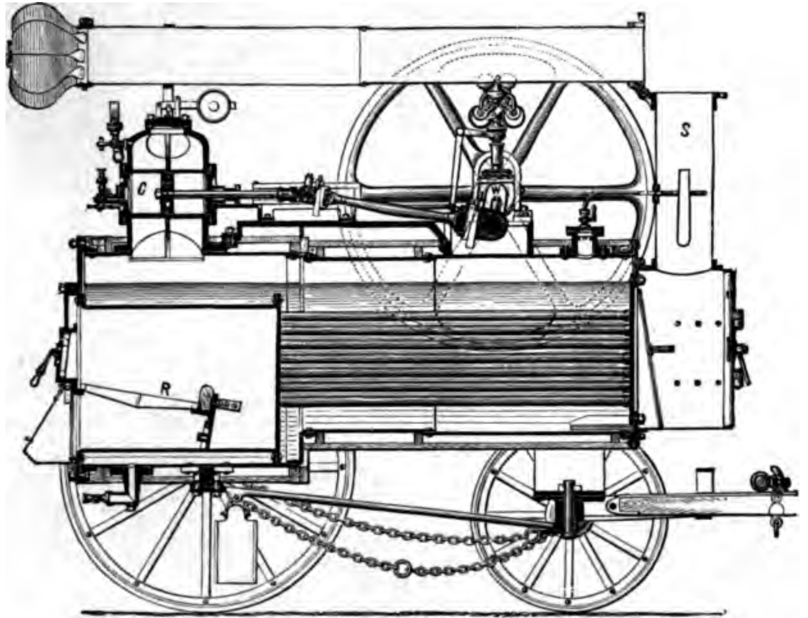
960. Schmidts Heißdampfmaschine.

hitzung gehegt wurden, voll bestätigt, ja sie sind sogar durch die Wirklichkeit no übertroffen worden. Versuche mit einer 35pferdigen stehenden Hochdruckmaschine habe den für diese Größe bis dahin unerhört niedrigen Kohlenverbrauch von 0,88—0,99 kg pr effektive Pferdekraft und Stunde ergeben. Versuche mit der ersten ausgeführten Tandem Verbund-(Kondensations-)Maschine von 60 Pferdestärken Leistung, ergaben einen Damp verbrauch von 5,6 kg pro Pferdekraftstunde, und zur Erzeugung des Dampfes wurden 0,7 k Kohlen pro Pferdestärke verbraucht. Der hervorragende und hochangesehene deutsch Fachmann, der letzteren Versuch leitete, Professor Schröter in München äußert sich, da die Schmidtsche Maschine den Anfang einer neuen Entwickelung der Dampfmaschine da stelle, an deren Weiterführung zu noch staunenswerteren Triumphen nicht zu zweifeln se

Die Lokomobilen.

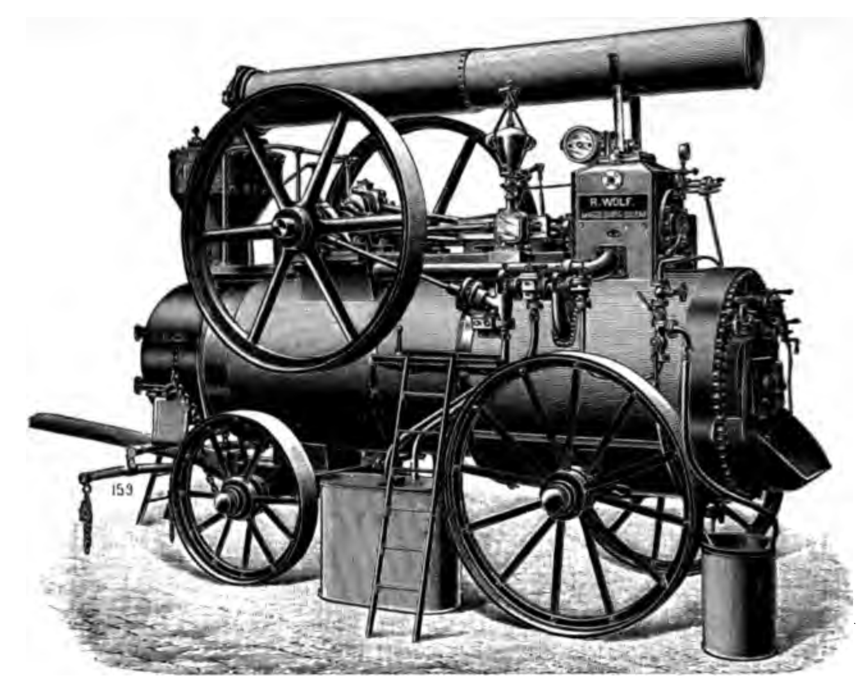
Dieselben sind Dampfmaschinen, welche direkt mit dem Dampferzeuger, dem Kesse vereinigt und in erster Linie von dem Gesichtspunkte aus konstruiert sind, eine trans portable Kraftmaschine zu schaffen, welche alles enthält, um an jedem beliebigen Ar

stellungsort ohne Fundamente und irgend welche sonstige Vorbedingungen Arbeit zu erzeugen, wenn nur die beiden Betriebsmittel Heizmaterial und Speisewasser vorhanden sind. Eine Lokomobile besteht daher aus einem Dampfkessel mit Feuerung und Schornstein und gesamter Ausrüstung und einer ebenso vollständigen Dampfmaschine, beide zusammen auf einem Fahrgerüst montiert. Der Kessel bildet den eigentlichen Körper der ganzen Maschine; auf ihm ist der ganze Bewegungsmechanismus befestigt. Über der Feuerbuchse liegt der Cylinder mit dem Schieberkasten; an dem anderen Ende ist die Schwungradwelle gelagert, und zwischen beiden, über oder neben dem Kessel bewegen sich die Kolbenstange, der Steuerungsmechanismus u. s. w. Die Lokomobilen sind seit den dreißiger Jahren in Gebrauch; lange Zeit wurden sie vorzugsweise aus England bei uns eingeführt, in neuerer Zeit ist aber der deutsche Lokomobilenbau dem englischen nicht nur gleich, sondern sogar an Solidität und Sorgfalt der Ausführung überlegen geworden. Die Lokomobilen finden für solche besondere Zwecke Anwendung, wo die Aufstellung fester Dampfmaschinen und Kessel nicht angängig oder rationell ist, also besonders für vorübergehende Arbeiten; sie gehören seit längerer Zeit zu den wichtigsten Hilfsmitteln der

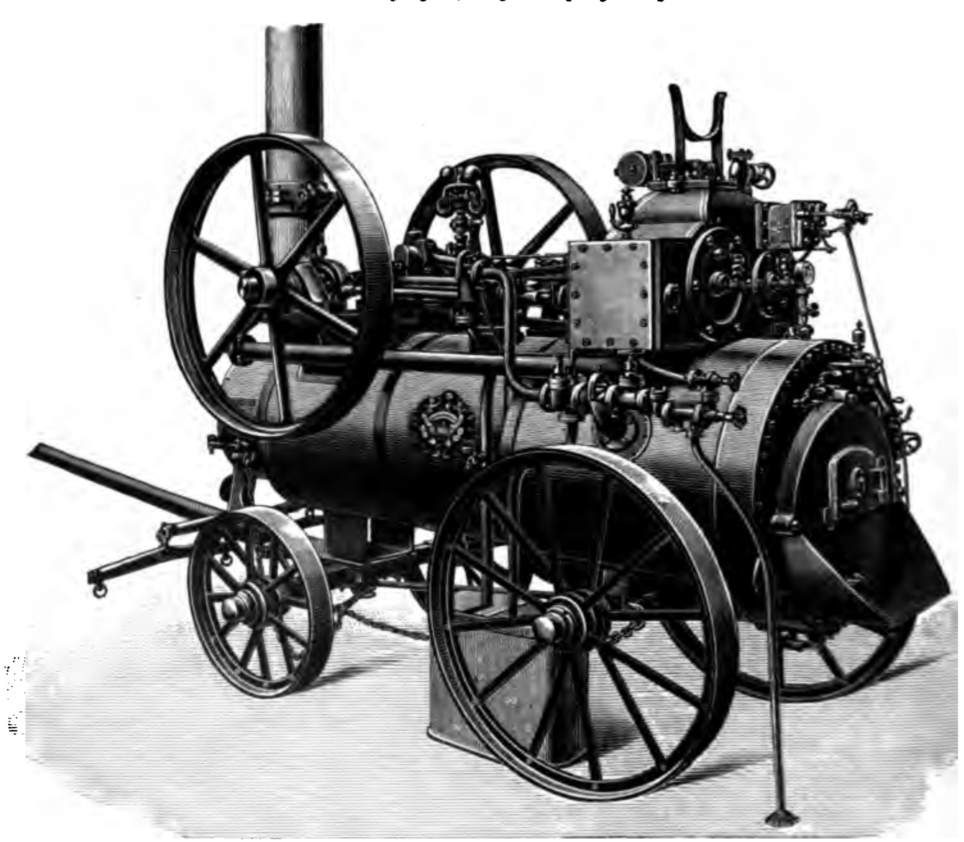


961. Lokomobile mit ausziehbarem Röhrenkessel (Durchschnitt).

Landwirtschaft. Aber auch für Pumpenbetrieb bei Wasserbauten, z. B. der Ausführung von Kanälen, Fundierungen, für transportable elektrische Beleuchtungsanlagen u. s. w. werden sie in ausgedehntem Maße angewendet. Die Kessel der Lokomobilen sind fast ausnahmslos nach dem Heizröhrensystem ausgeführt, und hieraus hat sich ein besonderer Lokomobilkesseltyp entwickelt, welcher schon früher besprochen wurde. Die Maschinen der Lokomobilen werden als Eincylinderhochdruckmaschinen, sowie in neuerer Zeit für große Leistungen auch nach dem Verbundsystem ausgeführt. In der Abb. 961 ist die Konstruktion des Kessels wie die Anordnung der ganzen Maschine mit Dampfcylinder, Kolben und Kolbenstange, Pleuelstange, Kurbel, Schwungrad und Regulator ersichtlich. Der obere Teil des Schornsteins S ist durch ein Scharnier umklappbar behufs besseren Transportes; er ist am oberen Ende mit einem Funkenfänger versehen. Die Feuerung ist meist mit einem gewöhnlichen Planrost R versehen; kompliziertere Feuerungskonstruktionen empfehlen sich nicht, doch gibt es auch Lokomobilen mit Einrichtung der Feuerung zur Rauchverzehrung. Abb. 962 zeigt eine fahrbare Hochdrucklokomobile mit ausziehbarem Röhrenkessel und selbstthätiger Expansionssteuerung von R. Wolf in Buckau-Magdeburg, der bedeutendsten



962. Fahrbare Hochdrucklokomobile mit selbstthätiger Expansionssteuerung von R. Wolf in Buckau-Magdeburg.



963. Fahrbare Receiver-Verbundlokomobile von R. Wolf in Buckau-Magdeburg.

deutschen Lokomobilenfabrik, welche auf mehreren Ausstellungen bei Leistungsversuchen die in Mitbewerb getretenen englischen Maschinen geschlagen hat. Für besondere Zwecke werden mit der Lokomobile zusammen auf einer hinteren Plattform oder direkt an dem Kessel die zu betreibenden Arbeitsmaschinen, wie Pumpen, elektrische Lichtmaschinen montiert. Pumpmaschinen dieser Art eignen sich zum Betriebe von Wasserstationen, zu Wasserbauten jeder Art und können auch als Dampffeuerspritzen verwendet werden; nach Abkuppeln der Pumpe können sie wie gewöhnliche Lokomobilen zu jedem anderen Betriebe dienen. Die Hochdrucklokomobilen werden für gewöhnlich von 8 bis zu 35 Pferdestärken Leistung ausgeführt; für größere Leistungen von etwa 20 bis zu 50 Pferdestärken empfehlen sich die zwar teueren und etwas komplizierteren, aber wegen der besseren Kohlenökonomie vorteilhafter arbeitenden Receiver-Verbundlokomobilen; eine solche von Wolf mit allem Zubehör zeigt Abb. 963.

Der Lokomobilbetrieb bietet in vielen Fällen auch für nicht mit Ortsveränderung verbundene Betriebe, also stationäre Anlagen, gegenüber den sonstigen Dampfkesseln und Dampfmaschinen manche Vorteile dadurch, daß Kessel, Maschine und sämtliches Zubehör in kompendiöser, übersichtlicher Weise zusammengefaßt sind. Seit längerer Zeit haben sich deshalb die sogenannten stationären Lokomobilen (die Bezeichnung ist eigentlich widersinnig, da bei der Lokomobile ja gerade die leichte Transportierbarkeit charakteristisch ist) vielfach mit gutem Erfolge eingeführt. Besonders sind sie da angebracht, wo sehr wechselnder Betrieb ist, also häufig größere Arbeitskraft gebraucht wird, als gewöhnlich, so auch als Reserve für Wasserkraftmaschinen, wenn z. B. die Turbinen nicht stets den vollen Arbeitsbedarf zu decken vermögen; dann haben sie noch den Vorzug, weniger Raum einzunehmen, als eine getrennte Kessel- und Maschinenanlage. Für regelmäßigen stationären Dauerbetrieb, und wenn genügend Platz für eine vollkommene Anlage mit Kessel und Maschine vorhanden ist, sind diese indessen im allgemeinen doch vorzuziehen, da sie in den Einzelheiten besser ausgebildet, den besonderen Verhältnissen angepaßt und auch besser unterhalten werden können; in einem Raum, in dem eine Kesselfeuerung, wie bei der Lokomobile, betrieben wird, ist eine baldige Verschmutzung der Maschinenteile nicht zu vermeiden, welche für letztere immer schädlich ist. Die Konstruktion der stationären Lokomobilen ist ganz dieselbe, wie bei den transportablen Lokomobilen, nur werden sie, statt auf ein Fahrgestell, auf feste gußeiserne Füße gesetzt.

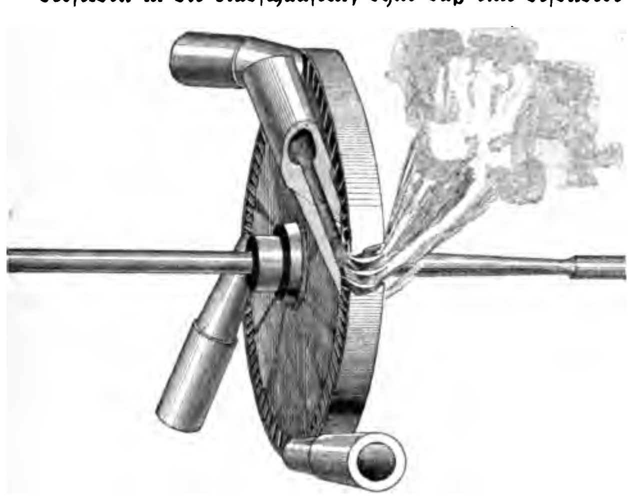
Die Dampfturbinen.

Schon seit langer Zeit sind vielfach Versuche gemacht worden, die Dampfkraft in anderer Weise, als bei den gewöhnlichen Dampfmaschinen auszunutzen, nämlich, statt durch die hin- und hergehende Bewegung eines Kolbens in einem Cylinder erst durch Zwischenglieder — Kolbenstange, Pleuelstange, Kurbel — eine drehende Bewegung zu erzeugen, eine einfachere Maschine zu konstruieren, bei welcher direkt eine rotierende Bewegung der Treibachse bewirkt wird. Man versuchte früher, hierzu das Arbeitsvermögen des gespannten Wasserdampfes in ähnlicher Weise auszunutzen, wie bei den Kolbendampfmaschinen; aber die entstandenen Konstruktionen litten an schwierigen Abdichtungen, einer großen Zahl beweglicher Teile und waren praktisch nicht verwendbar. Auch hat man schon vor langer Zeit Dampfmotoren nach der Form der Turbinen zu schaffen versucht; dieselben hatten aber wegen zu hohen Dampfverbrauches ungünstige ökonomische Ergebnisse; man verstand es nicht, die im Dampf enthaltene Energie in vorteilhafter Weise direkt in lebendige Kraft umzuwandeln, als welche sie bei der Turbine wirksam sein muß.

Seit etwa 10 Jahren sind nun zwei Dampfturbinen konstruiert worden, welche wesentliche Verbesserungen aufweisen. Auf der Ausstellung zu Manchester 1886 wurden die Dampfturbinen von Parson in weiteren Kreisen bekannt und bereits in größerem Maßstabe hier sowie in Newcastle zum Betriebe elektrischer Lichtmaschinen angewendet; auch auf der Pariser Weltausstellung 1889 waren dieselben in Betrieb, und in der englischen Marine haben sie seit längerer Zeit ausgedehnte Anwendung gefunden. In den letzten Jahren aber sind sie durch eine neue Konstruktion von Dr. Gustav de Laval in Stockholm in den Hintergrund gedrängt worden; die Lavalschen Dampfturbinen waren

ebenfalls 1889 in Paris ausgestellt und haben sich seit einigen Jahren mit sehr gutem Erfolg in ausgedehntem Maße in der Praxis eingeführt. Die Schwierigkeiten sind bei dieser Maschine in vortrefflicher einfacher Weise überwunden; die Geschwindigkeit des einströmenden Dampfes, von welcher die lebendige Kraft und damit die Arbeitsleistung abhängt, ist durch entsprechend geformte Einströmungsdüsen auf das erreichbare Maximum gebracht, und die Turbinenräder haben eine dieser hohen Geschwindigkeit thunlichst angemessene Umdrehungszahl.

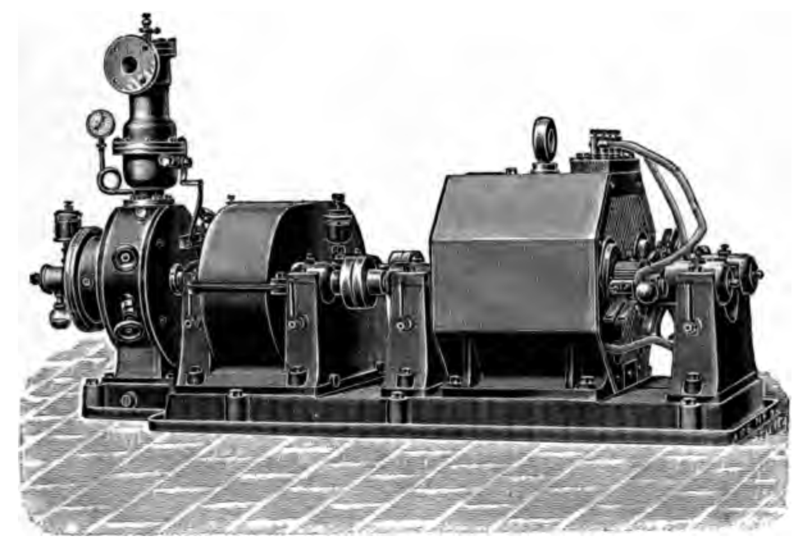
Wenn wir die früheren Darlegungen über die Turbinen auf die Lavalsche Dampfturbine übertragen, so ist diese eine Axialturbine mit partieller Beaufschlagung; dem auf einer dünnen horizontalen Welle sitzenden Laufrade wird der Dampf durch eine Anzahl unter spitzem Winkel gegen die Ebene des Laufrades gestellte, gegen letzteres sich konisch erweiternde Düsen, die den Leitkurven der gewöhnlichen Turbinen entsprechen, eingeführt. Die Anzahl der Düsen richtet sich nach der Stärke der Maschine und dem zur Verfügung stehenden Dampfdruck; bei einer 20pferdigen Turbine sind z. B. acht Düsen vorhanden; der Dampf tritt in geschlossenem Strahle aus den Mündungen derselben in die Radschaufeln, ohne daß eine besondere dampfdichte Verbindung zwischen Düsen und Laufrad erforderlich wird. Aus Abb. 964, die ein Laufrad mit der Welle und vier Dampfdüsen zeigt, ist die Wirkungsweise zu ersehen. Die Düsen sind durch einen geschlossenen ringförmigen Dampfkanal an das Hauptdampfzuströmungsrohr angeschlossen; letzteres ist mit einem Drosselventil versehen; auch eine Anzahl der Düsen können durch Ventile mit Handrad einzeln abgesperrt werden, um bei geringerer Beanspruchung den Dampf durch die übrigen mit vollem Druck möglichst ohne Drosselung arbeiten lassen zu können, da hierbei die Wirkung am vorteilhaftesten ist.



964. Laufrad und Düsen einer Lavalschen Dampfturbine.

In der Turbine wird nur die lebendige Kraft des aus den Düsen gegen die Schaufeln strömenden Dampfes ausgenutzt; eine Expandierung desselben, wie bei den Dampfmaschinen, findet im Rade selbst nicht statt. Die Düsen müssen also so gestaltet sein, daß der Dampf schon in diesen bis auf atmosphärische Spannung, beziehungsweise den Druck im Turbinengehäuse herab expandiert; durch die Volumenvergrößerung bei dieser Expandierung wird eine bedeutend erhöhte Ausströmungsgeschwindigkeit erzeugt, und so also die im gespannten Dampf enthaltene Energie in lebendige Kraft umgewandelt, welche auf die Schaufeln der Turbine übertragen wird. Die Dampfgeschwindigkeit beträgt an der Düsenmündung bei Expansion von 5 auf 1 Atmosphäre 770 m; wenn man den Dampf aus der Turbine nicht ausströmen läßt, sondern, wie bei Dampfmaschinen, in einen Kondensator führt und niederschlägt und so im Turbinengehäuse ein Vakuum erzeugt, dann steigt die Geschwindigkeit von 5 Atmosphären bis beispielsweise $^1/_{10}$ Atmosphäre auf 1100 m pro Sekunde. Diese hohe Geschwindigkeit kann allerdings im Rade nicht vollständig ausgenutzt werden, da die Umfangsgeschwindigkeit des letzteren zu hoch würde; dieselbe hat ihre Grenze bei etwa 350 m pro Sekunde, da durch die Zentrifugalkraft sonst eine zu hohe Beanspruchung des Materials hervorgerufen würde. Bei der sehr hohen Geschwindigkeit wird schon der Verlust durch die Reibung des Turbinenrades an der Luft erheblich; dies wird vermieden bei Anwendung von Kondensation, welche, wenn möglich, immer vorteilhaft ist. Die Laufräder bestehen aus zwei kräftigen Stahlscheiben, zwischen denen die einzelnen Schaufeln

mit gezahnten Stielen befestigt werden; der Durchmesser der Räder beträgt 10—50 cm bei Maschinen von 5—100 Pferdestärken; bei einer 20pferdigen Maschine ist der Durchmesser 20 cm, die Umfangsgeschwindigkeit 3000 m pro Sekunde. Die Umdrehungszahl ist 30000 bis 13000 pro Minute. Für eine solche außerordentliche Umdrehungszahl ist es praktisch unmöglich, das Rad genügend genau auszubalancieren; wenn sehr schnell rotierende Körper nicht genau um ihre Schwerpunktsachse umlaufen, werden selbst geringe Fehler in der Rotationsachse als vibrierende Bewegung auf die Lager übertragen; dies würden z. B. bei den Turbinenrädern schon bei $^{1}/_{10}$ mm Exzentrizität durch die Zentrifugalkraft auf jedes Kilogramm Gewicht etwa 100 kg Druck bewirken. Für diese Schwierigkeit hat de Laval eine einfache Lösung gefunden: er setzt sein Turbinenrad auf eine sehr dünne Achse — bei einer 20pferdigen Maschine ist z. B. die Welle nur 12—13 mm dick — welche so elastisch ist, daß sie die Fähigkeit besitzt, bei der Drehung den Einflüssen der Zentrifugalkraft nachzugeben, sich um ein sehr



965. De Lavalsche Dampfturbine mit zweiankeriger Dynamomaschine.

geringes Maß durchzubiegen, und so die Drehung um die genau richtig zentrische Hauptachse selbst herbeizuführen, welche dann bei jeder Geschwindigkeit beibehalten wird, so daß die zerstörenden Einwirkungen auf die Lager aufgehoben werden und eine vollkommen ruhige Rotation bewirkt wird. In Deutschland hat die große Maschinenbauanstalt Humboldt in Kalk bei Köln die Fabrikation der de Lavalschen Dampfturbine übernommen; sie führt Maschinen von 5 bis zu 200 Pferdestärken Leistung aus; (in Frankreich sind bereits solche bis zu 300 Pferdestärken hergestellt).

Da die genannten Umdrehungszahlen für irgend welchen direkten Antrieb von der Hauptwelle aus viel zu hoch sind, so wird die Umdrehungsgeschwindigkeit zunächst auf den zehnten bis dreizehnten Teil vermindert; die Bewegung wird von der Welle des Laufrades durch zwei kleine Schraubenräder und zwei Räder von zehn bis dreizehn Mal größerem Durchmesser auf eine in demselben Maschinengestell gelagerte Vorgelegewelle übertragen; diese kann durch direkte Kuppelung oder durch weitere Übersetzung mittels Riemenbetrieb die Kraft weiter an die Arbeitsmaschinen abgeben. Zum Betriebe von Maschinen mit hohen Umdrehungszahlen, wie Dynamomaschinen, Zentrifugalpumpen, Zentrifugen u. s. w. eignet sich die direkte Verbindung mit dieser Vorlegewelle, wodurch sich eine gedrängte, bei hoher Leistung sehr wenig Raum einnehmende Anordnung ergibt. Abb. 965 zeigt eine mit einer 30pferdigen Dynamomaschine direkt gekuppelte Dampfturbine. Bei derselben, sowie bei allen größeren Turbinen werden zur Aufhebung einseitiger Drucke zwei zu beiden Seiten der Hauptachse liegende Vorgelegewellen von der Turbinenachse angetrieben, welche

zur Bewegung zweier im gleichen Sinne rotierender Anker verwandt werden; dieselbe
können parallel oder hintereinander geschaltet und so nach Belieben zur Erzeugung vo
Strom mit 110 oder 220 Volt Spannung benutzt werden. Das Laufrad diese
Maschine macht 20000 Umdrehungen, die beiden Vorgelegewellen mit den Ankern de
Dynamomaschine machen 2000 Umdrehungen pro Minute. Das Turbinenrad liegt i
dem schmalen Gehäuse links; über demselben sitzt das Dampfeinströmungsventil, darübe
nach vorn der Anschlußflansch der Dampfleitung. Ein sehr empfindlicher Zentrifugal
regulator, der von einer der beiden Vorgelegewellen angetrieben wird, wirkt durch ei
Hebelgestänge auf das Drosselventil und hält die Umlaufszahl bei den verschiedenste
plötzlich wechselnden Belastungen bis auf 2—3% konstant, so daß die Maschine sowoh
für Lichtmaschinen wie auch für elektrische Kraftübertragung geeignet ist. An der vordere
Seite des Turbinengehäuses sind in der Zeichnung die Handrädchen der einzelnen Dampf
düsen sichtbar. Die Dynamomaschine ist auf der Abbildung in dem eckigen Schutzkaste
erkennbar, während das mittlere Gehäuse die mittleren Lager und die erwähnten Zahn
räderpaare umschließt.

Der Wirkungsgrad der Dampfturbinen ist ein sehr hoher, bei hoher Dampfspannun
wird derselbe ebenso wie bei Dampfmaschinen höher; man kann bei denselben viel höher
Dampfspannungen anwenden, als bei letzteren, da keine beweglichen, zu dichtenden Teile
wie Kolben und Stopfbüchsen, vorhanden sind. Kleinere und mittlere Turbinen von
bis 40 Pferdestärken gebrauchen, wenn der Dampf aus dem Gehäuse ins Freie geht
bei 6 Atmosphären Admissionsspannung 20—25 kg Dampf pro effektive Pferdekraft und
Stunde; bei sehr hoher Dampfspannung, bis zu 20 Atmosphären geht der Dampfverbrauch
bei 50—100pferdigen Maschinen ohne Kondensation bis auf 13—14 kg zurück. Wende
man dagegen Kondensation an, so wird die Wirkung noch viel günstiger; Turbinen von
20—40 Pferdestärken brauchen stündlich etwa 12—13 kg Dampf von 6 Atmosphären
Spannung oder 10—11 kg bei 20 Atmosphären, also soviel wie sehr gute größere
Verbunddampfmaschinen; bei den größten bisher ausgeführten Maschinen von 100 bis
300 Pferdestärken geht der Dampfverbrauch bis auf 9 kg zurück. Diese im Verhältnis zu
Kolbendampfmaschinen sehr günstigen Ergebnisse, verbunden mit der großen Einfachheit
des Betriebes und der Unterhaltung, dem geringen Raumbedarf und der leichten Auf-
stellung der Maschine dürften diesem neuen Motor mit großer Wahrscheinlichkeit eine
Stelle unter den modernen Kraftmaschinen sichern. Für die Aufstellung sind keine schweren
Fundamente, wie bei größeren Kolbendampfmaschinen notwendig, da keine wechselnden
Drucke und Massenwirkungen vorkommen; Turbinen bis 30 Pferdestärken können einfach,
wie die Abbildungen zeigen, mit einer gußeisernen Fundamentplatte auf den Boden
gesetzt werden.

Die Naphthadampfmaschine. Es wurde bereits weiter vorn angedeutet, daß
auch ein anderer Stoff wie Wasserdampf als Energieträger, d. h. Betriebsmittel für
die Dampfmaschinen, angewendet werden könnte; irgend eine andere Flüssigkeit, welche
sich leicht verdampfen läßt, kann an Stelle des Wassers treten. Seit Anfang der
neunziger Jahre baut die schon mehrfach genannte Maschinenfabrik Aktiengesellschaft
Escher, Wyß & Co. zu Zürich kleine Naphthadampfmaschinen zum Betriebe von
Booten; für diesen Zweck haben die Maschinen gewisse Vorteile. Der vertikale Kessel
besteht nur aus einem kupfernen Spiralrohre von etwa 1 l Inhalt; da ein solches
Rohr sehr hohem Druck mit Sicherheit widersteht, so ist die Explosionsgefahr sehr
gering. Die Feuerung geschieht ebenfalls mit Naphtha; ein großer Rundbrenner wird
direkt von dem im Kessel entwickelten Naphthadampf gespeist, der sich in einem Strahl-
apparat mit der erforderlichen Verbrennungsluft mischt; zur ersten Anwärmung dient
ein besonderer kleinerer Brenner, dem flüssiges Naphtha zugeführt wird. Der in
dem Schlangenkessel erzeugte Naphthadampf betreibt mit vier bis sechs Atmosphären
Spannung eine vertikale Dampfmaschine mit drei nebeneinander liegenden, einfach-
wirkenden Cylindern; letztere sind mit einem Gehäuse umgeben, in welches der Ab-
dampf aus den Cylindern ausströmt. Das Gehäuse ist durch eine Rohrleitung, die
unter dem Boot, also im Wasser liegt, mit dem Naphthavorratsbehälter verbunden;

der Naphthadampf kondensiert in dieser Leitung, und die Flüssigkeit kehrt in den Behälter zurück, aus welchem die Speisung des Kessels geschieht. Von dem Vorrat wird also nur das zur Feuerung notwendige Naphtha verbraucht. Die Ingangsetzung und der Betrieb der Maschine ist einfach: durch Anzünden des kleinen Brenners wird in einigen Minuten der geringe Inhalt des Spiralkessels bis zum Verdampfen erwärmt, worauf mit dem Naphthadampf der Hauptbrenner in Betrieb gesetzt wird; die Maschine kann dann aus jeder Stellung ohne Andrehen, wie dies bei Gas- und Petroleummotoren notwendig ist, direkt in Gang gesetzt werden, da die drei Kolben auf Kurbeln in verschiedener Stellung arbeiten.

Für größeren Kraftbedarf, sowie als Motor für Gewerbe und Industrie können solche Maschinen nicht in Betracht kommen.

Die Gaskraftmaschinen,

Benzin- und Petroleummotoren.

Allgemeines. Alte Gaskraftmaschinen. Barnett, Lenoir, Hugon, Otto & Langens atmosphärische Maschine. Ottos neuer Motor. Wirkungsweise von Ottos neuem Motor. Verschiedene Konstruktionen Deutzer Gasmotoren. Körtings Gasdynamomaschinen. 200pferdige Doppeltandem-Gasdynamomaschine. Gasmotoren für elektrische Städtebeleuchtung. Andere neue Gasmotorsysteme. Anordnung einer Gasmotoranlage. Betrieb mit Gasmotoren und Vergleich mit Dampfbetrieb. Weitere Entwickelung der Gaskraftmaschinen. Gasmotorbetrieb mit Kraftgas (Dowsongas). Große Gasmotoren. Benzin- und Petroleummotoren.

Durch die Erfindung und Ausbildung der Dampfmaschinen war für Industrie und Gewerbe eine Kraftmaschine geschaffen worden, durch welche früher ungeahnte Arbeitsleistungen ermöglicht wurden; für kleine mechanische Kraftleistungen an einzelnen Stellen, also für das Handwerk und Kleingewerbe sind aber die Dampfmaschinen nicht geeignet. Abgesehen davon, daß dieselben, je kleiner sie ausgeführt werden, einen immer geringeren Wirkungsgrad haben, also unökonomisch arbeiten, ist auch die Aufstellung und der Betrieb einer Dampfmaschine nebst Dampfkessel für kleine Werkstätten mit zu viel Umständlichkeiten verknüpft, um mit Vorteil Anwendung finden zu können. Wenn die Maschine auch nur zeitweise zu gehen braucht, muß doch der Kessel unter Dampf gehalten und gewartet werden; die Anlage von Dampfbetrieben ist wegen der Explosionsgefahr in den Städten, besonders in bewohnten Gebäuden, vielen Beschränkungen unterworfen. Das Handwerk und Kleingewerbe aber verlangt eine Kraftmaschine für kleinere Leistungen, welche wenig Raum einnimmt, überall aufgestellt und ohne Vorbereitungen und Umstände jederzeit nach Bedarf in Betrieb gesetzt werden kann; welche leicht zu bedienen ist, und wenn sie nicht gebraucht wird, keiner Wartung bedarf, deren Betrieb keine Gefahren mit sich bringt, welche schließlich in Beschaffung, Unterhaltung und Betrieb billig ist. Diesen Anforderungen, welche die Dampfmaschine durch ihre besonderen Eigenschaften nicht erfüllen kann, entspricht in weitgehender Weise die Gaskraftmaschine; sie ergänzt die Dampfmaschine für kleine und mittlere Arbeitsleistungen und ist seit längerer Zeit der weitaus wichtigste Motor für das Kleingewerbe geworden.

Die Gaskraftmaschinen gehören, wie die Dampfmaschinen zu den kalorischen Maschinen, indem die latente Energie brennbarer Körper, nämlich die in dem gasförmigen Betriebsmittel enthaltene Verbrennungswärme in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Das Wirkungsprinzip besteht in der Expansionskraft verbrennender Gase und explosiver Gasgemische; dasselbe ist eigentlich viel einfacher, als dasjenige der Dampfmaschinen, indem das Brennmaterial selbst direkt die Arbeit auf einen Kolben ausübt, während, wie wir gesehen haben, bei den Dampfmaschinen die bei der Verbrennung von Kohlen frei werdende Energie erst an einen anderen Wärme- oder Kraftträger, den Wasserdampf, übertragen werden muß. Es ist deshalb zu verwundern, daß die Gaskraftmaschine erst ein Jahrhundert nach der Dampfmaschine erfunden worden ist, obwohl die Eigenschaft der Expansionskraft verbrennender Gase schon lange vorher bekannt war.

Wenn man Leuchtgas und Luft in gewissen Verhältnissen zusammenmischt und in einem geschlossenen Gefäße entzündet, so verpufft oder explodiert das Gemisch mit

[illegible]

daß die Teile der Maschine in plötzlicher heftiger Stöße nicht [illegible] und zu rasch abnutzen würden. Man arbeitet deshalb [illegible] Maschinen wird die Temperatur bei der Verbrennung höher [illegible] Haltbarkeit der Maschine zulässt, es muß deshalb stets ein Teil der [illegible] durch beständige Kühlung der Cylinderwand möglichst [illegible] ist natürlich ein Verlust, da diese Wärme bei der Expansion [illegible] nicht nutzbar gemacht werden kann, und die Abkühlung darf deshalb [illegible] werden, als aus der genannten Rücksicht notwendig ist.

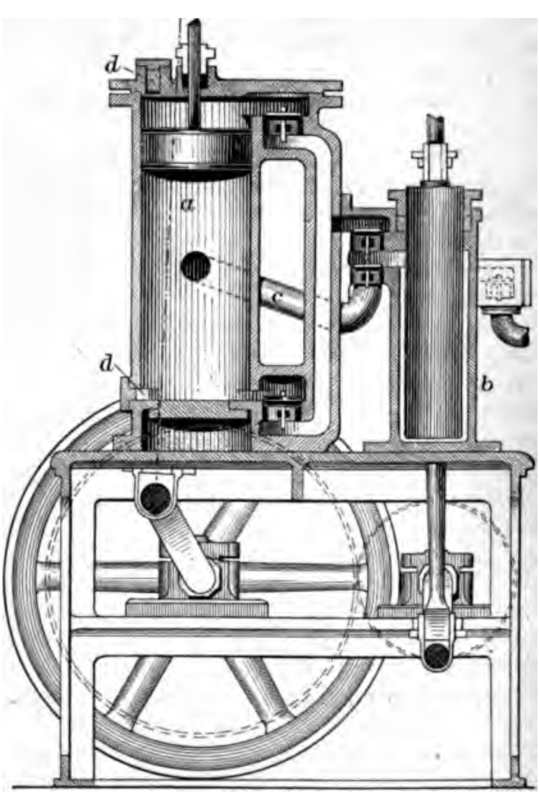
Da die Größe der durch eine Verpuffung geleisteten Energie der Menge [illegible] brannten Gase proportional ist, diese aber wieder bei einem bestimmten [illegible] der Dichtigkeit abhängt, so erhält man durch die Verwendung verdichteter [illegible] gemischter Gasgemische eine erhöhte Wirkung, und man benützt dies, indem man das Gemisch vor der Entzündung komprimiert.

Geschichtliche und technische Entwickelung.

Als älteste Gasmaschinen im weitesten Sinne könnten die Kanonen gelten [illegible] man von diesen ab, da sie keine Kraftmaschinen im gewöhnlichen Sinne des Worte[illegible] so müssen die Pulvermaschinen als die ersten Vorläufer der Gasmotoren ang[illegible] werden. Eine solche wurde schon von Huyghens konstruiert; in einer Schrift a[illegible] Jahre 1680 beschreibt er eine solche, welche Cylinder und Kolben hatte; letzterer [illegible] durch die Verbrennung von Schießpulver bewegt. Auch Papin konstruierte eine de[illegible]

Maschine, wie bereits in dem vorigen Kapitel mitgeteilt wurde; diese Bestrebungen blieben aber ohne Erfolg; ebenso Versuche, welche hundert Jahre später, gegen Ende des 18. Jahrhunderts in England gemacht wurden, bei denen schon brennbare Gase, nicht Pulver verbrannt wurden. In den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wurden in England mehrere Erfindungen von Gasmaschinen patentiert, von welchen diejenige von Wright (1833) den späteren Anordnungen schon ziemlich nahe stand: in einem Cylinder sollte ein Gemisch von brennbarem Gas und Luft ähnlich wie der Dampf in den Dampfmaschinen arbeiten; der Cylinder war mit einem Mantel zur Wasserkühlung und die Maschine mit einem Regulator zur Regelung der Gaszuströmung versehen.

Im Jahre 1838 wurden dann dem Engländer Barnett drei verschiedene Gaskraftmaschinen patentiert, welche im wesentlichen deutlich die Grundzüge erkennen lassen, nach denen später und bis jetzt die Gasmotoren ausgeführt wurden. Die erste Konstruktion war einfachwirkend; sie bestand aus einem Cylinder mit besonderem Laderaume, einer Luft- und einer Gaspumpe, die Luft und Gas in den Laderaum pumpen. Derselbe ist gefüllt, wenn der Arbeitskolben im toten Punkte steht; wird er nun mit dem Cylinder in Verbindung gesetzt, und das Gasgemisch entzündet, so wird durch die Explosion der Kolben aufwärts getrieben. Jetzt wird die Verbindung zwischen Laderaum und Cylinder geschlossen, und beim Rückgange treibt der Kolben die Verbrennungsrückstände aus dem Cylinder. Die Zündvorrichtung war bei dieser Maschine schon recht gut ausgedacht. Die zweite Maschine war nach demselben Prinzip konstruiert, doch doppeltwirkend, es war also zu beiden Seiten des Cylinders ein Laderaum, und bei jedem Hin- und jedem Hergange des Kolbens erfolgte eine Explosion.



966. Barnetts doppeltwirkende Gasmaschine.

Bei der dritten, ebenfalls doppeltwirkenden Maschine fehlte der Laderaum; die Maschine ist in Abb. 966 dargestellt; a ist der Arbeitscylinder, b die Luftpumpe; dahinter liegt die Gaspumpe. Das Gas-Luftgemisch wurde von den beiden Pumpen direkt in den Cylinder gepreßt und zwar abwechselnd über und unter den Kolben. Die Verbrennungsgase werden durch ein in der Mitte des Cylinders ausmündendes Rohr c ausgeblasen oder auch durch eine besondere Ansaugepumpe ausgesaugt. Befindet sich also der Kolben z. B. in der höchsten Stellung, so ist der Cylinderraum unter ihm von der letzten Explosion her mit Verbrennungsgasen gefüllt; beim Niedergehen des Kolbens werden sie durch c ausgeblasen, bis der Kolben den halben Hub gemacht hat und die Ausströmung zudeckt; hierauf wird der noch verbliebene Rest verdichtet, und gleichzeitig drücken jetzt beide Pumpen Gas und Luft in den unteren Cylinderraum, welche sich also mit den Rückständen mischen; über und unter der höchsten bezw. tiefsten Stellung des Kolbens bleibt noch ein Raum des Cylinders frei, in welchem das Gemisch vom Kolben verdichtet wird. Ist letzterer in der tiefsten Stellung angelangt, so erfolgt die Zündung des komprimierten Gemisches, und das Spiel wiederholt sich auf der anderen Seite; das Ausblasen der Ver-

brennungsgase beginnt sofort, wenn der Kolben die Ausblaseöffnung überschritten ha diese also freigelegt ist. Die Zündung sollte durch Platinschwamm geschehen, welcher i die Höhlung d gelegt wurde; die Entzündungsfähigkeit sollte durch die Verdichtung i der Weise erhöht werden, daß bei der höchsten Verdichtung, also in der Endlage de Kolbens, die Entzündung erfolgen sollte.

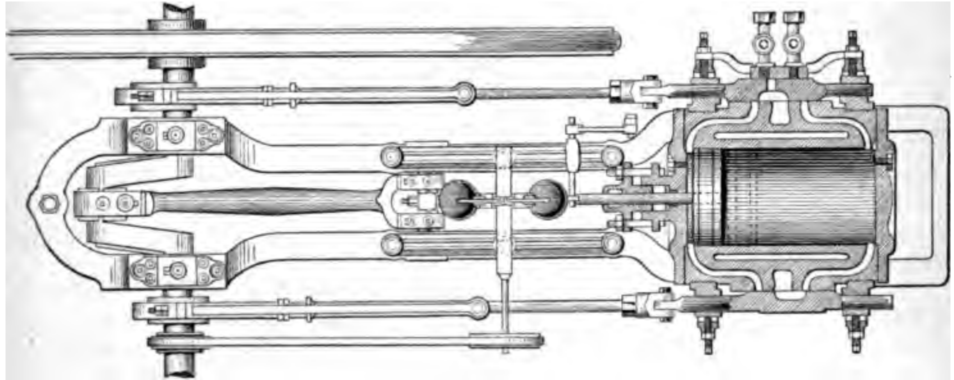
Diese Maschine litt zwar an verschiedenen Mängeln, so daß sie wohl überhaupt nic betriebsfähig war — von einer praktischen Ausführung ist wenigstens nichts bekannt g worden — aber die Ideen zu derselben enthalten fast alles, was das Wesen der heutige Gasmaschinen ausmacht; hauptsächlich ist die Verdichtung des Gas-Luftgemisches vor de Zündung wichtig, aber es scheint, daß Barnett selbst diesen großen Vorteil gar nicht b sonders beachtet hat. Weitere Fortschritte der Barnettschen Konstruktion sind die Ve legung des Laderaumes in eine Verlängerung des Arbeitscylinders selbst und die Zündun im toten Punkt. Merkwürdig ist es, daß die Barnettsche Erfindung nicht weiter aus gebildet wurde; sie geriet fast ganz in Vergessenheit, und die Patentschrift wurde erst vi später wieder hervorgesucht bei Gelegenheit von Patentstreitigkeiten bei späteren Kon struktionen.

Ebenso wie diese Maschinen von Barnett hatten zahlreiche Anordnungen in de nächsten beiden Jahrzehnten keinen weiteren Erfolg; sie blieben weiteren technischen Kreise unbekannt, bis 1860 mit der ersten wirklich brauchbaren Gasmaschine von Lenoir er die eigentliche Entwickelung der Gasmotoren begann. Lenoir war ursprünglich Arbeite in einer Bronzefabrik; später begründete er mit einem Gesellschafter eine galvanoplastisch Anstalt, hatte mit diesem Unternehmen aber keinen Erfolg, ebensowenig mit der Idee den Elektromagnetismus für motorische Kraftbewegung dienstbar zu machen. Er erkannt bald, daß die Kostspieligkeit der auf diesem Wege zu erzeugenden Kraft die praktische An wendung ausschloß; jetzt versuchte er, statt des Elektromagnetismus die Explosivkraft vo Gas-Luftgemischen zur Erzeugung mechanischer Arbeitsleistung zu benützen, und nac manchen mißlungenen Versuchen gelang ihm diese Aufgabe. Er verband sich mit de Pariser Maschinenfabrikanten Marioni, welcher an der praktischen Ausbildung de Maschine einen wesentlichen Anteil hat, und erwarb 1860 ein Patent auf seine Gasmotor.

Alle Gaskraftmaschinen lassen sich, wie die Dampfmaschinen, in atmosphärische un direkt wirkende einteilen, und der prinzipielle Unterschied ist wie dort der, daß bei erstere durch die Verbrennung einer geringen Menge Gas-Luftmischung der Kolben ohne Arbeits leistung angetrieben wird, worauf durch Abkühlung die Spannung der Verbrennungsga in dem Cylinder schnell weit unter den äußeren Luftdruck zurückgeht, so daß dieser unte Arbeitsleistung den Kolben zurückdrückt. Bei den direkt wirkenden Gasmotoren wird da gegen die bei der Verbrennung des Gases im Cylinder frei werdende Energie durch de Expansionsdruck der Verbrennungsgase direkt auf den Kolben zur Nutzarbeit übertrage Die beschriebene Barnettsche Konstruktion war direkt wirkend; ebenso die Lenoirsch Maschine. Dieselbe erwies sich als ziemlich brauchbar und erregte viel Aufsehen. Wen auch die Prinzipien, nach denen Lenoir seine Maschine konstruierte, gegenüber den Barnett schen kaum einen Fortschritt enthalten, so gebührt doch Lenoir das Verdienst, durch Aus dauer den erfinderischen Gedanken in die That umgesetzt zu haben; Lenoir muß deshal als der Erfinder der Gaskraftmaschine gelten. Seine Maschine ist in Abb. 967 da gestellt; aus derselben ist ersichtlich, daß sie sich in Anordnung und Konstruktion ganz a die Dampfmaschine anlehnte. Während des ersten Teiles des Hubes saugt der Kolben ungefähr bis in die punktierte Stellung, das Gemisch von Gas und Luft in den Cylinde worauf die Steuerung den Einströmungskanal schließt und durch einen elektrischen Funk die Zündung bewirkt wird; das Gasgemisch verpufft, wobei ein Druck von 5—6 Atmo sphären entsteht, und treibt den Kolben bis ans Ende des Hubes. Während des darau folgenden Rückganges des Kolbens werden die Verbrennungsgase durch den Auslaßschiebe ausgetrieben, und das Spiel wiederholt sich. Für die elektrische Zündung diente ein In duktionsapparat in Verbindung mit einer Bunsenschen Batterie; durch den Gang de Kolbens wurde in einer bestimmten Lage eine Unterbrechung des Induktionsstromes bewirk

und ein Funken in dem Gasgemische im Cylinder erzeugt. Im übrigen arbeitete die Maschine, wie schon erwähnt, ganz ähnlich wie eine Dampfmaschine. Die Bewegung des Kolbens wurde durch Kolbenstange und Pleuelstange auf die Kurbel der Schwungradwelle übertragen, und von letzterer aus geschah durch Excenter mit Schieberstange und Schieber die Steuerung der Gas- und Lufteinströmung und des Auslasses für die Verbrennungsgase.

Die Lenoirschen Gasmotoren waren ganz gut durchdacht und konstruiert, und sie arbeiteten bei sorgfältiger Behandlung ruhig und ziemlich sicher. Kurz nachdem die ersten Maschinen nach der Patenterteilung im Frühjahr 1860 in Betrieb gekommen waren, bemächtigte sich ihrer aber eine weit übertriebene marktschreierische Reklame, welche der weiteren Entwickelung mehr geschadet als genützt hat. Fabelhafte Berichte wurden nicht nur in den Tagesblättern, sondern auch in den meisten technischen Zeitschriften dieses Jahres über die neue Erfindung veröffentlicht; die Maschine sollte, abgesehen von allen anderen Vorzügen, viel billiger arbeiten als die Dampfmaschinen, der die letzte Stunde geschlagen hätte, u. s. w. Bald aber stellte sich ein starker Rückschlag ein; als die ersten Maschinen eine Zeitlang in Betrieb gewesen waren und die Gasrechnungen einliefen, zeigte es sich, daß die Betriebskosten sehr hohe waren; genaue Versuche ergaben anstatt des in Aussicht gestellten $1/2$ mindestens 3 cbm Gasverbrauch pro Pferdekraft und Stunde. Hiermit war ihr Schicksal entschieden; die größte Zahl derselben wanderte bald ins alte



967. Lenoirs Gasmotor.

Eisen, und ebenso wie anfangs die Anpreisungen über das Ziel hinaus geschossen hatten, so wurde die Maschine jetzt schlechter gemacht, als sie wirklich war. Ein besonderer Übelstand trug hierzu noch bei, der sehr hohe Schmiermaterialverbrauch; man verglich sie mit rotierenden Fettklumpen und sagte in ironischer Übertreibung, daß sie zwar keines Heizers, dafür aber eines ständigen Ölgießers bedürfe. Thatsächlich lag die Wahrheit in der Mitte. Der Lenoirsche Gasmotor war für manche Zwecke des Kleingewerbes, wo aus den schon besprochenen Gründen die Anwendung einer Dampfmaschine sich nicht eignete, eine ganz brauchbare Kraftmaschine, und er hat sich auch bis in die siebziger Jahre hinein selbst neben den späteren neueren und vollkommneren Konstruktionen vielfach behauptet.

Gleichzeitig mit Lenoir, doch unabhängig von ihm, hat der Gasanstaltsdirektor Hugon zu Paris, nachdem er lange Zeit ohne Erfolg versucht, eine atmosphärische Gaskraftmaschine zu konstruieren, einen Gasmotor gebaut, welcher, wie der Lenoirsche, direkt und doppeltwirkend war und neben diesem in den sechziger Jahren Erfolge gehabt hat. Hugons Motor war durch einige Verbesserungen dem Lenoirschen etwas überlegen; der Gas- und Ölverbrauch war geringer; ersterer betrug etwa 2,5 cbm pro Pferdekraftstunde. Die zuweilen versagende elektrische Funkenzündung war durch eine sicherer funktionierende Zündung mittels einer besonderen kleinen Zündflamme ersetzt.

Mit der zweiten Pariser Weltausstellung im Jahre 1867 beginnt ein neuer Abschnitt in der Entwickelung der Gasmaschine. Hier stellten Otto & Langen in Deutz einen kleinen $1/2$pferdigen Gasmotor von ganz neuerer Konstruktion auf, der anfänglich kaum beachtet und jedenfalls keineswegs günstig beurteilt wurde; die Maschine schien für ihre

Leistung verhältnismäßig groß und machte im Betriebe ein starkes, unregelmäß und unangenehmes Geräusch. Als sie aber genauer geprüft, mit Bremsdynamom und Gasmesser die Leistung und der Gasverbrauch festgestellt und hierdurch unw leglich bewiesen wurde, daß letzterer das bis dahin unerhört niedrige Maß von 0,8 cbm pro Pferdekraft und Stunde betrug — ein Ergebnis, welches erst in neu Zeit von guten Maschinen übertroffen worden ist — da war ihre Überlegenheit alle früheren Gasmaschinen erwiesen. Sie war eine **atmosphärische** Maschine, ein wirkend und stehend angeordnet. Das Wesentliche der Konstruktion liegt darin, daß Explosionsdruck nicht vom Kolben auf eine Pleuelstange und eine Kurbelwelle übertr wird, sondern daß der Kolben durch die Explosion frei auffliegt, ohne Verbindung der Schwungradwelle; erst in der höchsten Stellung wird durch ein eigentümliches Sc werk die Kurbel von der Kolbenstange gefaßt; unter dem Kolben entsteht durch die kühlung der Verbrennungsgase ein hohes Vakuum, und der äußere Luftdruck treibt Kolben unter Arbeitsleistung nieder. Während des Auffliegens des Kolbens bewegt die Maschine nur durch die lebendige Kraft des Schwungrades weiter. Bei voller K beanspruchung folgen die Kolbenhübe unmittelbar aufeinander; wenn aber bei gering Kraftbedarf die Umdrehungsgeschwindigkeit sich erhöht, dann wird durch eine Regu vorrichtung bewirkt, daß der Kolben nach dem Niedergange einige Zeit unten bleibt; wenn die Geschwindigkeit auf das richtige Maß zurückgegangen ist, also neue K zuführung erforderlich ist, kommt wieder eine Zündung und damit ein Auffliegen Kolbens zustande. An Stelle der elektrischen Funkenzündung war eine Zündfla eingeführt. Diese Otto & Langensche atmosphärische Gaskraftmaschine hat 10 Jahre trotz mancher Mängel als die beste Kraftmaschine für das Kleingewerbe fast allein Feld beherrscht; über 10000 Maschinen sind in dieser Zeit von der Firma aufge worden; jetzt hat auch diese Konstruktion nur noch geschichtliches Interesse. Die Erfi sowohl wie andere Techniker waren in der Folgezeit unablässig thätig, die Mängel Maschine zu beseitigen, was aber trotz mancher Änderungen und Verbesserungen vollkommen gelang.

Ottos neuer Motor. Um die Zeit der dritten Pariser Weltausstellung warf selbe Firma Otto & Langen — welche sich inzwischen in die Deutzer Gasmotorenfa umgewandelt hatte — nachdem sie 10 Jahre vorher mit ihrer atmosphärischen Masc so erfolgreich eine Umwälzung im Gasmotorenbau eingeleitet hatte, die ganzen Ergebn dieser Entwickelung bei Seite und ging wieder auf die direkte Wirkung zurück. Die gestellte direkt wirkende, nach ihrem Erfinder Otto genannte Maschine war ein vorzüg durchkonstruiertes Meisterwerk, bei welcher durch erhebliche Verbesserungen die Übelstä der älteren direkt wirkenden Anordnungen gründlich beseitigt waren. Sie stellte bald früheren Konstruktionen in den Schatten und wurde das Vorbild zu fast allen späte Konstruktionen. Abgesehen von der vortrefflichen Konstruktion aller Einzelteile lie die wesentlichen Verbesserungen in folgenden drei Punkten: der Verdichtung des G gemisches vor der Zündung, Zündung im toten Punkte, Anwendung des Viertaktes. allen früheren Gasmaschinen wurde das Gas-Luftgemisch im Arbeitscylinder ohne be mit atmosphärischer Spannung zur Verbrennung gebracht; wie schon vorn erwähnt, n aber die Wirkung um so höher, je dichter das Gemisch ist; bei der Ottoschen Masc und bei allen späteren Konstruktionen wird dasselbe deshalb vor der Zündung auf bis 3 Atmosphären verdichtet. Hierdurch wird der Cylinder und damit die ga Maschine für eine bestimmte Arbeitsleistung kleiner. Für die Aufnahme des Gasgemisc ist der Cylinder an einer Seite verlängert; wenn der Kolben sich an dieser Seite in sei Endstellung befindet, bleibt noch der mit dem komprimierten Gasgemisch gefüllte „La raum" frei. Durch diese Anordnung war es möglich, in der Endstellung, wenn Kolben beim Hubwechsel keine Geschwindigkeit hat, die Zündung zu bewirken; die G expandieren hierauf während des ganzen Kolbenhubes und drücken Arbeit leistend auf Kolben. Durch diese Anordnung der Zündung im toten Punkte wurden die Schläge u Stöße vermieden, welche bei der Zündung während des Kolbenhubes bei Überschreitu einer für den günstigen Nutzeffekt zu geringen Kolbengeschwindigkeit entstanden. Du

den sogenannten Viertakt schließlich wird erreicht, daß der Arbeitscylinder gleichzeitig als Gasansauge- und Kompressionspumpe dient. Der Arbeitsvorgang ist folgender:

1) Beim ersten Hub des Kolbens wird durch den geöffneten Einlaßschieber und ein Mischventil ein aus etwa $^1/_{10}$ Gas und $^9/_{10}$ Luft bestehendes, also verdünntes Gasgemisch angesaugt;

2) beim Rückgange wird die Einströmung geschlossen und das angesaugte Gemisch im Cylinder bezw. im Laderaum oder Verdichtungsraume verdichtet; der Grad der Verdichtung hängt also von dem Volumen des letzteren ab;

3) am Ende dieses Hubes, im toten Punkte, erfolgt die Zündung, und der Druck der Verbrennungsgase treibt den Kolben voran; hierbei beträgt die Spannung anfangs etwa 11 Atmosphären, und sie sinkt bei der Expansion bis auf etwa 3;

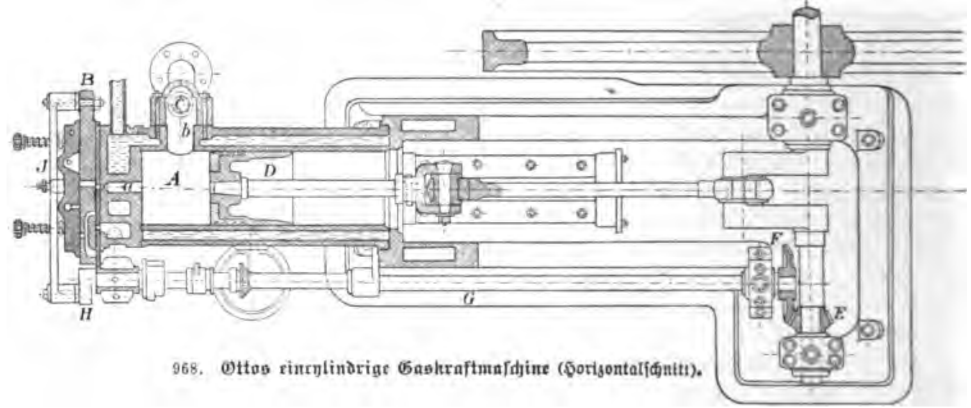
4) beim zweiten Rückgange öffnet sich der Auslaßkanal, und der Kolben treibt die Verbrennungsgase aus. Hierbei bleibt aber ein Rest in dem Laderaume zurück, welcher also bei dem jetzt wieder folgenden Ansaugehube das frische Gasgemisch verunreinigt, d. h. verdünnt; früher war man stets mit besonderer Sorgfalt bemüht gewesen, die Verbrennungsrückstände möglichst vollständig aus dem Cylinder zu beseitigen; der Erfinder der neuen Maschine verließ diese alte Tradition, und es zeigte sich, daß er den besten Erfolg damit hatte; die Rückstände erschwerten keineswegs die Verbrennung, sondern bewirkten nur an Stelle der plötzlichen Explosion ein langsameres, ruhigeres Verbrennen. Um eine sichere Zündung zu gewährleisten, wurde auf geeignete Weise dafür gesorgt, daß zu der Zündungsstelle selbst ein unverdünntes, also frisches starkes Gasgemisch zugeführt wurde. Bei dem neuen Ottoschen Motor finden keine eigentlichen Explosionen mehr statt, sondern, wie der Erfinder selbst schon in der Patentschrift hervorhebt, das Gasgemisch verbrennt im Gegensatz zu den früheren Explosionsmotoren langsam, gleichmäßig, ruhig und ohne Stoß. Hierdurch ist der Gang der Ottoschen und der nach demselben Prinzip konstruierten vielen anderen modernen Gaskraftmaschinen bei guter Konstruktion und sorgfältiger Ausführung ruhig und gleichmäßig, so daß sie zum Betriebe von Spinnereien, Webereien, sowie auch der so sehr empfindlichen Elektrodynamomaschinen angewendet werden können. Plötzliche starke Stöße, sowie auch das unangenehme starke Geräusch, die lästigen Eigenschaften der alten Explosionsmotoren, sind durch die Ottosche Erfindung beseitigt.

Aus der obigen Darstellung der Wirkungsweise geht hervor, daß auf vier einfache Kolbenhübe, also zwei volle Kurbelumdrehungen, nur ein Krafthub kommt; die bei diesem erzeugte Arbeit muß zur Ausgleichung zum großen Teile von einem kräftigen Schwungrade aufgenommen werden, welches jedesmal in den 3 folgenden Hüben oder $1^1/_2$ Umdrehungen die aufgenommene Energie abgibt, um die Arbeitsmaschinen ohne merkenswerte Verlangsamung im gleichmäßigen Gange zu halten und auch die für diese drei Hübe erforderliche Kraft herzugeben. Unter Übertragung der bei anderen Maschinen üblichen Bezeichnungen einfach- oder doppeltwirkend ist also der neue Ottosche Motor „halbwirkend“.

Die drei wesentlichen Grundprinzipien des Ottoschen Motors waren eigentlich nicht vollständig unbekannt; viel früher hatte schon Barnett die Kompression und die Zündung im toten Punkt angegeben, und auch der Viertakt war schon beschrieben worden; aber die Vorgänger Ottos hatten es nicht verstanden, die praktischen Schwierigkeiten, welche sich der Anwendung dieser Ideen entgegenstellten, zu überwinden, also diese Ideen fruchtbar zu machen; sie hatten wohl Gasmotoren nach denselben erdacht, aber nicht in die Wirklichkeit überführen können. Es ist deshalb ganz unberechtigt, Otto den Erfinderruhm streitig machen zu wollen, ihn nur als einen geschickten Konstrukteur hinzustellen; denn abgesehen davon, daß die Patente Barnetts und eine Schrift über die Anwendung des Viertakts längst vergessen und überhaupt kaum je bekannt geworden sind, daß also Otto diese Ideen selbständig von neuem erfinden mußte, ist der Schritt von einem bekannten Prinzip bis zu einer brauchbaren Ausführung oft schwieriger, als die erste Erfassung der Idee. Erst nachdem der Ruhm der Ottoschen Erfindung sich in der Welt verbreitete, wurden alte längst vergessene, verstaubte Schriften und Patente aus den Aktenschränken wieder hervorgesucht.

Nach den obigen Darlegungen ist die Konstruktion und Wirkung des Ottoschen Motor an der Abb. 968 leicht zu erkennen; die Zeichnung stellt die ursprüngliche liegende, eincylindrige Konstruktion dar, wie sie mit geringen Abänderungen auch heute noch gebaut wird. Aus derselben ist ersichtlich, daß die ganze Anordnung die einer gewöhnlichen liegenden Hochdruckdampfmaschine ist. A ist der Cylinder, der von einem mit Wasser gefüllten Kühlmantel umgeben ist; an einem Ende ist er offen, an dem anderen mit einer Verlängerung, dem Verdichtungsraume, versehen, dessen Länge etwa gleich $^2/_3$ des Kolbenhubes ist. Im Boden des Verdichtungsraumes befindet sich die Öffnung a für den Einlaß des Gas-Luftgemisches und für die Zündung; dieselbe wird durch den Schieber B geöffnet und geschlossen; die Steuerung desselben geschieht von der Hauptwelle aus durch die konischen Zahnräder E F, die Steuerwelle G und die Kurbel H mit Pleuelstange J derart, daß während des Saughubes die Öffnung a mit der Gas- und Luftzuleitung in Verbindung gebracht, während der drei anderen Hübe aber davon abgeschlossen ist, und daß in dem Augenblicke des toten Punktes nach der Kompression durch die Öffnung eine Zündflamme in die Ladung schlägt; die genauere Konstruktion kann hier nicht näher erörtert werden. Eine zweite seitliche Öffnung b mit Ventil C in dem Verdichtungsraume ist der Auslaß der Verbrennungsgase, welche durch das Ventil C während des Ausblasehubes geöffnet wird. D ist der Arbeitskolben, der in bekannter Weise die Kraft mittels Kolbenstange, Pleuelstange und Kurbel auf die Schwungradwelle überträgt.

Die Regulierung des Ganges geschieht durch einen Schwungkugelregulator in Verbindung mit einem Gasabsperrventil meist in der Weise, daß letzteres bei Überschreitung einer bestimmten Umdrehungszahl der Maschine ganz geschlossen, durch den Einströmungsschieber also nur Luft angesaugt wird; es fällt hierdurch eine oder eine Reihe von Verpuffungen aus, bis

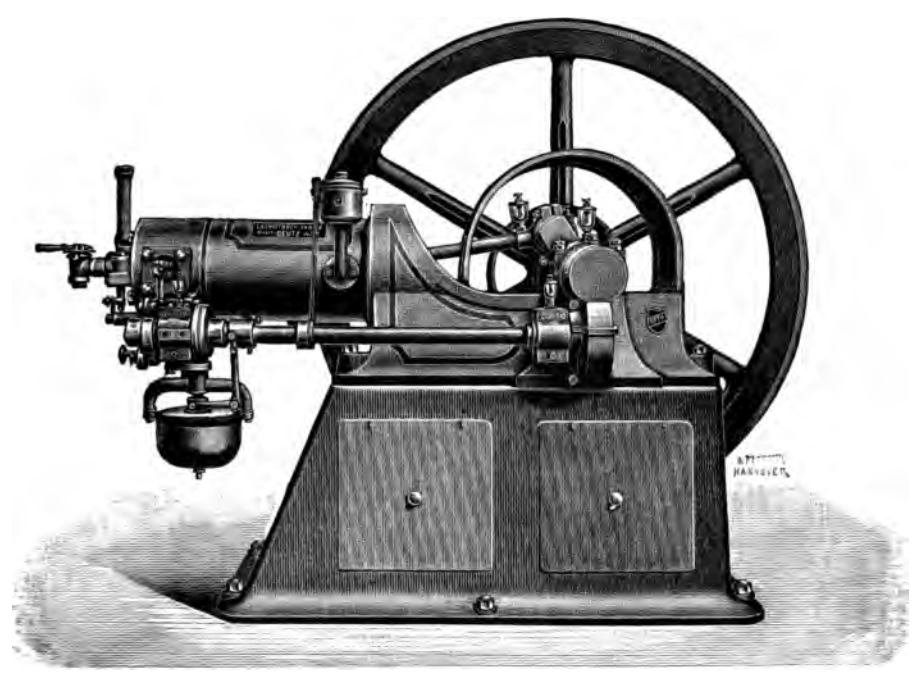


968. Ottos eincylindrige Gaskraftmaschine (Horizontalschnitt).

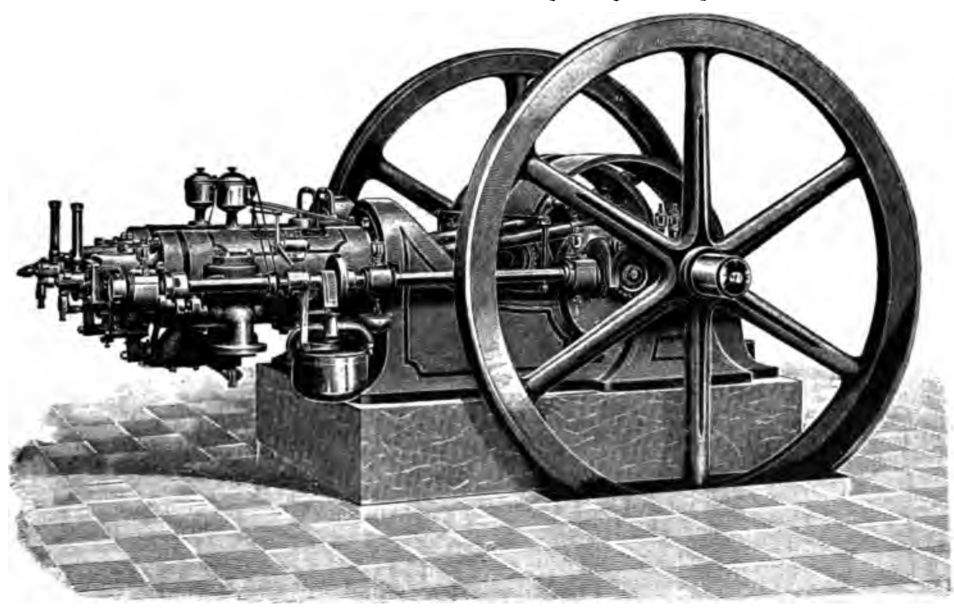
wieder die regelmäßige Geschwindigkeit eingetreten ist und das Gasventil von dem sich senkenden Regulator geöffnet wird. Durch diese Anordnung, daß entweder eine volle Ladung verpufft, oder gar keine Verbrennung stattfindet, wird erreicht, daß das Gasgemenge bei einmal eingestelltem Mischventil und bestimmtem, konstantem Gasdruck stets dasselbe günstigste Mischungsverhältnis von Gas zu Luft hat. In neuester Zeit werden die Deutzer Motoren auch mit zwangsläufiger Ventilsteuerung anstatt der Schiebersteuerung versehen.

Die Ottoschen Maschinen, auch Deutzer Motoren genannt, werden von der Gasmotorenfabrik Deutz in den verschiedensten Größen von $^1/_8$ und $^1/_4$ pferdigen Zwergmaschinen bis zu 200 Pferdestärkenleistung — der größte bisher gebaute Gasmotor von 200 Pferdestärken wird weiterhin noch kurz besprochen — sowie in der verschiedensten Anordnung ausgeführt. Die ersten Ausführungen waren, wie schon erwähnt, liegende Eincylindermaschinen; eine solche mittlerer Größe (8 Pferdestärken) zeigt Abb. 969. Wenn ein sehr gleichmäßiger Gang verlangt wird, werden die Maschinen auch mit zwei Schwungrädern, je einem an jedem Ende der Welle, hergestellt. Für die meisten Verwendungszwecke, besonders für gewerbliche Betriebe, ist die Gleichmäßigkeit der eincylindrigen Motoren, obwohl sie wie oben dargelegt, auf zwei volle Umdrehungen nur einen Krafthub haben, genügend. Speziell für Motoren zum Betriebe elektrischer Lichtmaschinen aber führte der Umstand, daß schon die kleinsten Unregelmäßigkeiten im Gang, besonders wenn keine Akkumulatoren angewendet werden, sich als Schwankungen in der Lichtstärke der Glühlampen bemerkbar machen, zu der Konstruktion des Zwillingsmotors (Abb. 970). Derselbe ist aus zwei nebeneinander liegenden Cylindern mit gemeinschaftlicher Kurbelwelle kombiniert, und die Steuerung ist so ein-

gerichtet, daß beide Kolben immer abwechselnd ihren Krafthub haben, so daß die Kurbelwelle bei jeder Umdrehung einen Kraftantrieb erhält; der Zwillingsmotor arbeitet also einfachwirkend. Dasselbe Resultat wird durch eine andere Anordnung erzielt, wenn



969. Ottos neuer Gasmotor in liegender Anordnung.



970. Ottos neuer Zwillingsmotor.

nämlich zwei Cylinder einander gegenüber zu beiden Seiten der Schwungradwelle liegen und ihre Kolbenstangen gemeinschaftlich auf eine Kurbel wirken; einen solchen Zwillingsmotor und zugleich die größte bisher von der Deutzer Gasmotorenfabrik hergestellte Ma-


571. Zwillingsmotor von 200 effektiven Pferdestärken des Baseler Wasserwerks (Gasmotorenfabrik Deutz).

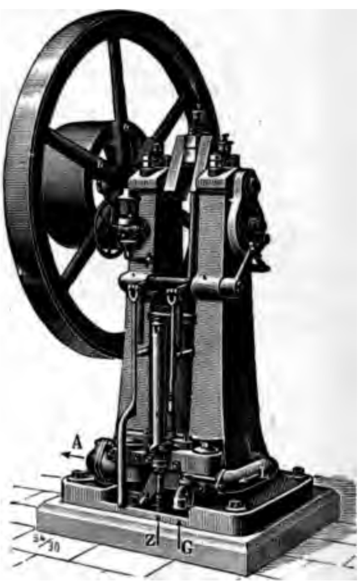
schine (200 Pferdestärken Leistung) zeigt Abb.
Dieselbe ist bis zum Jahre 1897 die größte
kraftmaschine deutscher Herkunft; die weiterhin
beschriebene 200pferdige Körtingsche Maschi
aus zwei Motoren kombiniert und hat vier
beitscylinder; dieser Deutzer Motor hat aber
100pferdige Cylinder. Er dient zum P
betrieb beim städtischen Wasserwerk zu Basel.
noch weitergehende Ansprüche an die R
mäßigkeit des Ganges, welche an die Mot
zum Antrieb elektrischer Lichtmaschinen ge
wurden, erfüllen zu können, wurde eine an
Regelung eingeführt, wobei allerdings auf
Vorzug der oben erwähnten Regulierungsein
tung, die möglichst günstige Gasökonomie,
zichtet werden mußte. Man ließ nicht mehr g
Füllungen ausfallen, sondern arbeitete mit varia
Füllungen, die fortwährend nach der jeweil
Umdrehungsgeschwindigkeit eingestellt wurde

Die Ottoschen Motoren haben nicht nu
Deutschland, sondern auch im Ausl
einen außerordentlichen Erfolg geh
es sind bis zum Jahre 1897 im ga
nach den Deutzer Patenten über 42
Maschinen mit über 170000 Pfe
stärken Leistung ausgeführt worden

Dieser große Erfolg hat, wie m
zu erwarten war, zahlreiche andere
finder und Fabriken zu Nachahmun
und neuen Anstrengungen ermun
Seit längeren Jahren hat sich
größere Anzahl Maschinenfabriken
bestem Erfolg mit dem Bau von G
motoren befaßt. Die meisten Kons
tionen lehnen sich eng an das Ott
Vorbild an; viele sind, besonders
dem die ursprünglichen Ottoschen Patente
fallen sind, direkte Nachahmungen derselben.
auch manche gute neue Anordnungen und
treffliche neue Konstruktionen in den Einzelhe
sind entstanden. Mit sehr wenigen Ausnah
haben aber alle die früher genannten drei Ha
grundlagen, Komprimierung des Gasgemis
Zündung im toten Punkte und Viertakt, beibeha

Von den 72 Fabriken, die sich im Jahre 1
in Deutschland mit der Herstellung von Gask
maschinen befaßten, seien hier noch kurz die K
struktionen von Gebrüder Körting in Hann
besprochen, welche Firma wohl nach der De
Fabrik in erster Linie steht. Dieselbe baut V
taktmaschinen von Körting & Lieckfeld. Beson
schön an denselben sind die Zündung und
Regelung. Das Gas-Luft-Mischventil ist so
gerichtet, daß in jeder Stellung das Mi

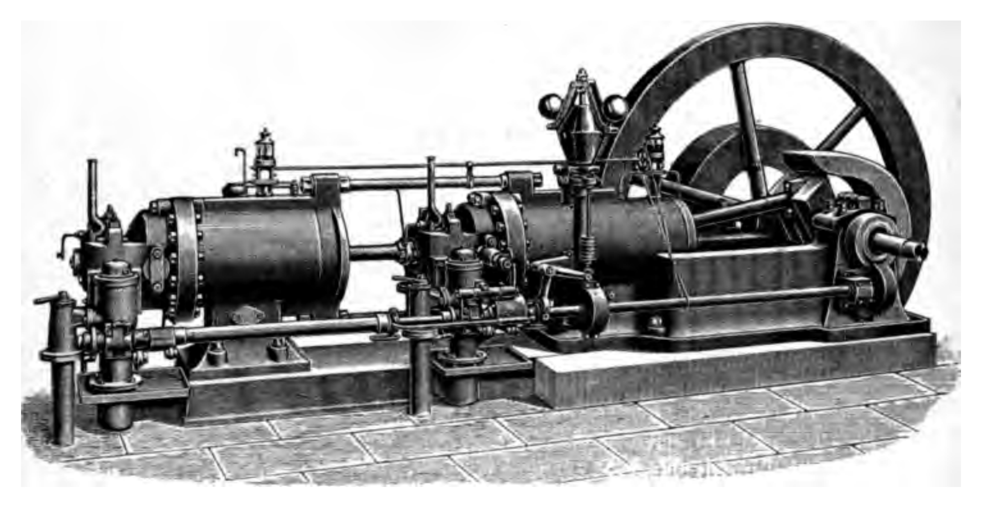
verhältnis dasselbe bleibt. Abb. 972 zeigt einen gewöhnlichen Körtingschen Motor in stehender Anordnung. Eine eigentümliche Anordnung haben die Körtingschen Tandemmotoren; sie haben, wie Abb. 973 zeigt, zwei hintereinander liegende Arbeitscylinder mit durchgehender Kolbenstange, die Arbeit beider Cylinder wird also auf eine Kurbel übertragen.



972. Stehender Gasmotor von Gebrüder Körting in Hannover.

In den letzten Jahren haben die Gaskraftmaschinen besonders für den Betrieb elektrischer Lichtwerke, sowohl für Zentralstationen, zur Versorgung ganzer Städte, wie auch für Blockstationen und Einzelanlagen in umfangreicher Weise Anwendung gefunden. Gerade für den Betrieb elektrischer Beleuchtungsanlagen kommen die wesentlichsten Vorteile des Gasmotors: geringer Raumbedarf, bequeme Bedienung, stete Betriebsbereitschaft in erhöhtem Maße zur Geltung. Der Antrieb der Dynamomaschinen kann durch Riemen oder auch durch direkte Kuppelung erfolgen; speziell zum Betriebe kleinerer Dynamos baut die Gasmotorenfabrik Deutz in neuester Zeit schnelllaufende Motoren stehender Anordnung. Aus der genannten Fabrik sind bis 1897 für elektrischen Betrieb allein 1700 Motoren mit zusammen etwa 20000 Pferdestärken hervorgegangen und zwar die Hälfte hiervon innerhalb fünf Jahren.

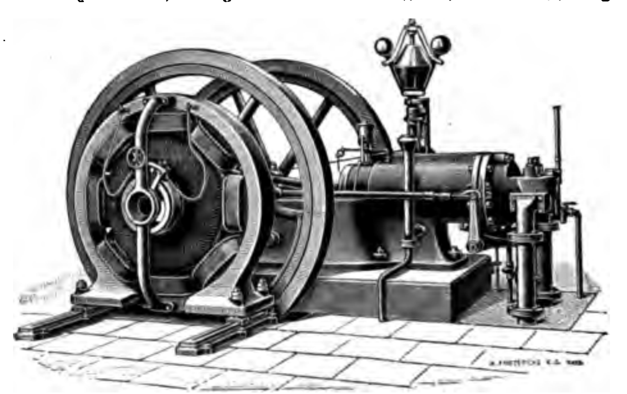
In recht guter Weise haben auch Gebrüder Körting ihre Präzisionsmotoren zum Betriebe von Elektrodynamomaschinen, sowohl für Riemenantrieb schnell laufender, wie auch für direkte Kuppelung langsamer laufender Dynamos ausgebildet, besonders ihre letztere Anordnung ist recht


973 Körtings Tandem-Gasmotor.

geschickt und kompendiös konstruiert. Abb. 974 zeigt eine solche sogenannte Gasdynamomaschine; bei derselben ist der Anker einer für geringe Umdrehungszahl konstruierter Dynamomaschine direkt auf die Welle eines liegenden Präzisionsmotors gekeilt, und die Dynamomaschine bildet hierdurch mit der Kraftmaschine ein Ganzes, die Anordnung wird sehr einfach, der Raumbedarf der geringste. Weitere wichtige Vorteile sind Betriebssicherheit und hoher Nutzeffekt, welche durch Fortfall aller beweglichen Teile zwischen Kraftmaschine und Dynamomaschine erreicht werden.

Auf der Deutsch-Nordischen Handels- und Industrie-Ausstellung in Lübeck 1895 b einen Hauptanziehungspunkt, sowohl für Techniker als auch für Laien eine 200pf Körtingsche Gasdynamomaschine, welche den gesamten elektrischen Strom für die Ausst erzeugte, mit dem 166 Bogenlampen, 800 Glühlampen, 9 Scheinwerfer und eine A Motoren gespeist wurden. Es war eine Doppeltandem-Gasdynamomaschine und der g Gasmotor, der bis dahin in Deutschland in Thätigkeit gewesen ist. Die Maschine war biniert aus zwei nebeneinander, auf derselben Seite von der Welle liegenden Tandemm nach Abb. 973 mit gemeinschaftlicher Kurbelwelle; die Dynamomaschinen waren ange wie in Abb. 974, die Regulierung geschah durch variable Füllungen, so daß nie ein Kra ausfiel. Man konnte ferner je nach der Beanspruchung, also dem Strombedarf, beliebi zwei, drei oder alle vier Kraftcylinder arbeiten lassen, indem man einfach beliebig die zuleitung zu einem Cylinder oder zu mehreren absperrte, worauf der betreffende Kolben lief. Auf diese Weise konnte man die Maschine den verschiedensten Anforderungen, vo Viertel bis zur vollen Leistung anpassen, bei annähernd gleichbleibendem Wirkungsgrad, i jeder einzelne Cylinder in seiner Arbeitsleistung annähernd konstant blieb, also in ökon vorteilhafter Weise arbeitete. Der Gleichförmigkeitsgrad der Maschine war bei allen verschiedenen Variationen derartig, daß er für den elektrischen Betrieb vollkommen ausr und kein Schwanken des Voltmeters zu bemerken war.

Einfach und schön war noch die Einrichtung zum Ingangsetzen der Maschine. motoren laufen, wie weiterhin noch dargelegt wird, nicht von selbst an; sie müssen vielmeh durch äußere Kraft in Gang gesetzt werden. Bei größeren Maschinen ist ein „Andrehen" der Hand nicht möglich. Bei der besprochenen 200pferdigen Maschine wurde die Ing setzung durch Druckluft be Durch eine mittels besonl kleinen Motors betriebene kompressionspumpe wurd einem Behälter gepreßte erzeugt. Dieser Behälter durch eine Leitung mit Einströmungsventil eines vier Kraftcylinder in Ve bung: durch eine einfache, einem Handgriff zu bewirk Umstellung wurde die Pre in den Arbeitscylinder ei lassen, wo sie den Kolben wärts trieb und so die schine in Bewegung setzte. beiden Enden der Kurbelw war je eine Gleichstromdyn aufgesetzt; dieselben waren rallel geschaltet, weil der St in der Ausstellung mit 110 Volt verteilt wurde; jede Dynamo lieferte bei 110 Volt bis 600 Am



974. Körtings Präzisions-Gasdynamomaschine.

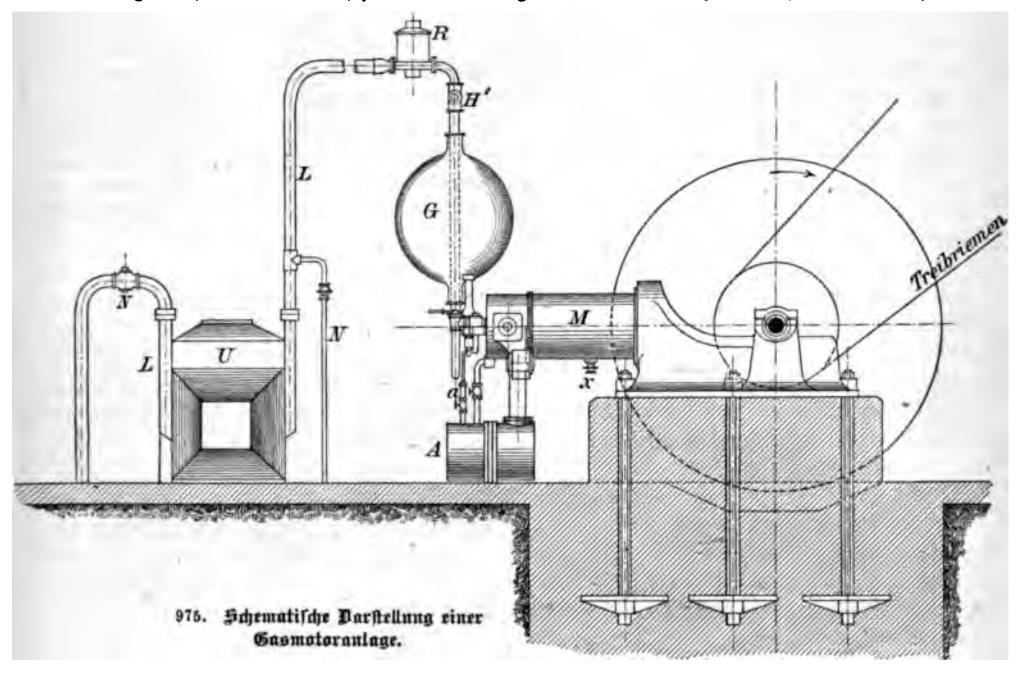
Durch Hintereinanderschaltung der beiden Dynamos hätte man mit derselben Masc einen Strom von 220 Volt für ein Dreileitersystem erzeugen können.

Der Gasverbrauch der Maschine betrug für die Stunde und effektive Pferdestärke Leis 500 l, und da man zwölf 16kerzige Glühlampen mit einer Pferdestärke betreibt, so wurde voller Leistung für die Glühlampe und Stunde eine Gasmenge von 40—45 l verbraucht

Gasmotor-Blockstationen für elektrische Städtebeleuchtung. Wäh bis vor kurzer Zeit in größeren Städten nur große elektrische Zentralen mit Dam betrieb und ausgedehntem Leitungsnetz für berechtigt und technisch wie wirtschaf günstig gehalten wurden, wird neuerdings vielfach die Ansicht verteidigt, daß gegen diesen großen Zentralen doch die Ausführung mehrerer in der Stadt verteilten Ein anlagen, sogenannter Blockstationen, mit Gasmotorbetrieb eine Zukunft hätte, und bei näh Betrachtung aller Verhältnisse, unter Berücksichtigung der Erfahrungen, welche bis bei den elektrischen Zentralen gemacht worden sind, hat diese Ansicht wohl einige gründung. Die großen elektrischen Zentralanlagen erfordern von vorherein die A wendung großer Kapitalien, welche zum großen Teil in das ausgedehnte Leitungs gesteckt werden müssen; besonders letzteres muß von vornherein viel stärker und grö angelegt werden, als dem Bedarf für eine Reihe von Jahren entspricht. Infolge hohen Zinsen- und Amortisationslast arbeitet das Werk auf lange Jahre wirtschaft ungünstig. Ein ganze Reihe von deutschen städtischen Elektrizitätswerken hat Jahre l durch nicht die Verzinsung und entsprechende Abschreibungen decken können. Durch Bl

stationen mit Gasdynamos unter Verwendung des städtischen Leuchtgases bietet sich das Mittel, mit Aufwendung von nicht zu großen Kapitalien allmählich, dem Bedürfnisse folgend, die Hauptverkehrsviertel einer Stadt mit elektrischer Beleuchtung zu versorgen, besonders seit der großen Vervollkommnung der Gasmotoren für Dynamobetrieb. Daß elektrische Einzelanlagen mit Gasmotorbetrieb gegenüber Zentralanlagen wirtschaftlich lebensfähig sind, wird bewiesen durch die Existenz und Errichtung zahlreicher neuer derartiger Anlagen in Städten, welche längst elektrische Zentralen besitzen.

Andere Gasmotorsysteme. Bei weitem die meisten modernen Gasmotoren arbeiten, wie schon erwähnt, nach dem Viertakt; bei einigen neueren Konstruktionen hat man aber versucht, von diesem Prinzip abzugehen. Es sind in England Maschinen konstruiert worden, welche im Sechstakt arbeiten; nach den vier Hüben der Viertaktmaschinen macht der Kolben noch einen Hin- und Hergang, bei welchem nur Luft angesaugt und mit den nach dem vierten Hube noch im Laderaum zurückgebliebenen Verbrennungsrückständen vermischt wieder ausgeblasen wird. Hierdurch bleibt nach dem



975. Schematische Darstellung einer Gasmotoranlage.

sechsten Hube hauptsächlich Luft mit geringen Mengen Verbrennungsgasen zurück. Da letztere aber auch in der Menge, wie sie beim Viertakt zurückbleiben, nach der Erfahrung nicht schädlich sind, so ist diese neue Konstruktion als ein Fortschritt kaum anzusehen. Bei einer Sechstaktmaschine von Griffon wird mit beiden Kolbenseiten im Sechstakt gearbeitet, so daß also jeder sechste Hub auf jeder Seite, oder im ganzen jeder dritte Hub ein Krafthub ist. Ebenso könnte man natürlich auch Viertaktmaschinen beiderseitig arbeiten lassen, wodurch auf vier Hübe oder zwei Umdrehungen zwei Krafthübe kommen; man hat sich indessen bisher auf einseitige Arbeit beschränkt wegen der Befürchtung der zu hohen Cylindererwärmung. Einige deutsche und englische Konstruktionen arbeiten im Zweitakt; sie haben zwei Cylinder, einen Arbeitscylinder und eine gesonderte Pumpe; letztere saugt das Gasgemisch und drückt es in den Arbeitscylinder, wo bei jedem Kolbenhingang eine Verpuffung stattfindet, während beim Rückgang die Verbrennungsgase ausgetrieben werden.

Die allgemeine Anordnung einer Gasmotoranlage zeigt schematisch Abb. 975. Der Motor M ist mittels Ankerschrauben und Ankerplatten auf einem gemauerten Fundamentklotz befestigt; L L ist die Gaszuleitung, in welche der Gasmesser U eingeschaltet ist; vor demselben befindet sich der Gashaupthahn N. Da beim jedesmaligen Ansaugen des

Motors periodisch verhältnismäßig viel Gas entnommen und wieder plötzlich die
nahme ganz unterbrochen wird, so würden auf erhebliche Entfernung in der Gasl
Druckschwankungen entstehen, wodurch ein Zucken der in der Nähe befindlichen
flammen verursacht würde; um dies zu verhindern, wird in die Leitung nahe vo
Motor ein Gummibeutel G eingeschaltet, in diesem sammelt sich aus der Zuleitun
Gasvorrat, von welchem der Motor in regelmäßigen Intervallen bei den Saug
gespeist wird. Wenn durch einen Gummibeutel das Zucken nicht verhindert wi
schaltet man noch einen zweiten ein; neuerdings werden auch vielfach Druckregul
verwendet, in der Zeichnung deutet R einen solchen an. H' ist ein zweiter Gasab
hahn; vor diesem und vor dem Gummibeutel und dem Regulator zweigt die
Leitung N ab, zur Speisung der Zündflamme. Durch das Rohr a wird aus dem To
atmosphärische Luft für die Gasmischung angesaugt, der Ansaugetopf hat den Zweck
Geräusch beim Saugen abzuschwächen. Unter dem Cylinder befindet sich im Kühlm
ein Ablaßhähnchen x, um im Winter beim Stillstehen des Motors das Kühlwasse
dem Mantel entleeren zu können. Bei allen Gasmotoren ist der Arbeitscylinde
einem Mantel umgeben; in den Zwischenraum wird fortwährend kaltes Wasser zuge
welches den Cylinder kühlt und dann abfließt. Bei größeren Maschinen ist der Verb
an Kühlwasser ein beträchtlicher; wenn nicht genügende Mengen Wasser zur Verfü
stehen, oder die Entnahme aus der Wasserleitung zu teuer wird, kann das aus dem M
abfließende, auf etwa 70° C. erwärmte Wasser wieder abgekühlt werden und erneu
Verwendung kommen, so daß nur eine bestimmte Wassermenge immer durch Cylinderm
und Kühler zirkuliert. Gebrüder Körting wenden seit Jahren zu diesem Zweck Ri
kühler bei ihren Motoren mit gutem Erfolg an.

Zur Inbetriebsetzung eines Gasmotors, speziell einer Viertaktmaschine, muß zu
durch äußere Kraft das Schwungrad mit Kurbelwelle so weit gedreht werden, daß
Kolben einen Ansauge- und den folgenden Kompressionshub macht, damit die erste
puffung stattfinden kann. Bei kleinen Maschinen kann dies direkt durch Drehen
Schwungrad mit der Hand geschehen; um die Transmission nicht mit drehen zu brau
kuppelt man diese vorher aus. Bei größeren Maschinen hat man besondere Anlaß
richtungen, bei ganz großen Motoren stellt man häufig einen kleinen Motor mit
welcher nur den Zweck erfüllt, den großen in Gang zu setzen.

Gaskraftmaschinen und Vergleich mit Dampfbetrieb. Der Betrieb
einem modernen Gasmotor ist äußerst angenehm: kein Kessel, kein Heizer, auch kein
gießer, wie bei den alten Maschinen; kein Lärm, größte Reinlichkeit, geringer R
bedarf, jederzeitige Betriebsbereitschaft; der Gasmotor ist durch diese Eigenschaften
Zeit und auch für die nächste Zukunft die beste Kraftmaschine für geringeren und mitt
Kraftbedarf, besonders für das Kleingewerbe. Der Gasverbrauch moderner guter
kraftmaschinen, wie sie außer von den beiden früher genannten Firmen von zahlre
anderen Fabriken hergestellt werden, beträgt bei den kleineren Sorten 700—9
stündlich pro effektive Pferdekraft, während derselbe bei mittleren und größeren Masch
z. B. von der Deutzer Gasmotorenfabrik und Gebrüder Körting, nach genauen, einw
freien Messungen schon unter 500 l zurückgegangen ist. Bei 500 l und einem mittl
Heizwerte des Steinkohlengases von 5200 Kalorien pro Kubikmeter bedeutet dies
Ausnutzung der Verbrennungswärme oder einen thermischen Nutzeffekt von annäh
25 %. Der Wirkungsgrad der Gasmotoren ist also ganz bedeutend höher, als bei
Dampfmaschinen, und wenn die Betriebsmaterialien dieser beiden wichtigsten Arten
kalorischen Maschinen, das Steinkohlengas und die Kohle, in Bezug auf ihre
brennungswärme annähernd gleichen Preis hätten, dann würden die Gaskraftmasch
die Dampfmaschinen, für die meisten Verwendungszwecke bald verdrängen. Aber in
Preisverhältnis des Gases zur Steinkohle liegt der Grund, daß im allgemeinen für g
Leistungen die Dampfmaschinen trotz ihres viel niedrigeren Wirkungsgrades wirtschaf
den Gasmotoren noch überlegen sind.

Während aber, wie früher näher dargelegt, die Dampfmaschinen, wenigstens
dem bisherigen Wirkungsprinzip und bei Verwendung gewöhnlichen, nicht überhi

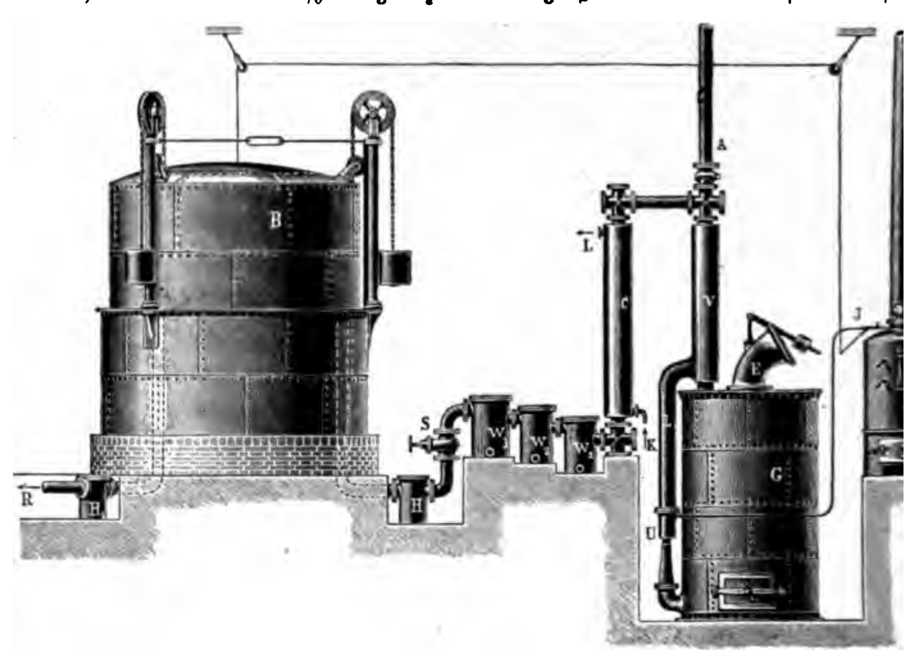
Wasserdampfes, nahe an der Grenze ihrer Verbesserungsfähigkeit stehen, ist eine bedeutende weitere Vervollkommnung der Gaskraftmaschinen nicht nur theoretisch möglich, sondern auch mit Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Die tüchtigsten Fachleute arbeiten unausgesetzt und mit gutem Erfolge an dieser Aufgabe; ein Hauptmangel liegt bis jetzt darin, daß die bei der Verbrennung frei werdende Energie der Verbrennungsgase bei weitem nicht vollkommen ausgenutzt wird, da letztere nur bis zu einem gewissen Grade expandieren und dann beim Rückgange des Kolbens mit noch verhältnismäßig hoher Spannung ausgetrieben werden; auch ist der Wärme- und damit Energieverlust durch die notwendige Kühlung der Cylinderwand eine beträchtliche. Es sind mehrfach Vorschläge und Versuche gemacht worden, Verbundmaschinen zu konstruieren, bei denen, ähnlich wie bei den Verbunddampfmaschinen, die Verbrennungsgase nach ihrer teilweisen Expansion im ersten Arbeitscylinder in einen zweiten Niederdruckcylinder übergeführt werden, in dem durch weitere Expansion der Rest ihrer Spannung ausgenutzt wird. Es haben sich indessen der Verwirklichung dieser Idee große praktische Schwierigkeiten entgegengestellt, welche zu überwinden bis jetzt nicht gelungen ist. Nach Ansicht hervorragender Fachleute kann indessen eine Steigerung der Wärmeausnutzung des Gases bis über 40%, so daß für eine Pferdestärke Leistung nur ein Gasverbrauch von 300 Liter stündlich erforderlich wäre, angenommen werden. Hierdurch würden die Betriebskosten derart vermindert, daß die Gasmotoren auch mit größeren Dampfmaschinen in Konkurrenz treten könnten.

Motorenbetrieb mit Generator- (Dowson)-Gas. Um Gasmotoren auch dort verwenden zu können, wo kein Leuchtgas vorhanden ist, sie also von städtischen Gasanstalten unabhängig zu machen, sowie auch, um bei zu hohen Gaspreisen den Betrieb billiger zu machen und hiedurch für größeren Kraftbedarf in der Industrie zu ermöglichen, ist man seit einigen Jahren bemüht gewesen, ein einfaches Verfahren zu finden, billiges Kraftgas zu erzeugen. Zur Krafterzeugung eignen sich außer dem Steinkohlen- (Leucht)-Gase das **Wassergas** und das **Generatorgas**. Die Darstellung des ersteren ist im kleinen Maßstabe für einzelne kleinere Etablissements zu kompliziert und verlangt ziemlich umfangreiche Anlagen. Für Zentralanlagen ist dagegen die Wassergasversorgung beispielsweise in Nordamerika, wo das wichtigste Rohmaterial, die Anthracitkohle, billig ist, in ausgedehntem Maße in Anwendung. Für Einzelanlagen eignet sich weit besser das Generatorgas. Besonders die von dem Engländer **Dowson** erfundene Einrichtung zur Herstellung desselben ist sehr einfach. Das Dowsongas wird aus Anthracit oder Koks gewonnen, indem man überhitzten Dampf und Luft durch den glühenden Brennstoff bläst; hierbei entsteht durch Verbrennung des Kohlenstoffes zunächst Kohlensäure, welche beim Durchstreichen durch weiteres glühendes Material zu Kohlenoxyd reduziert wird; der Wasserdampf wird zerlegt, und das erzeugte Gas hat etwa folgende Zusammensetzung: Wasserstoff 14—18%, Kohlenoxyd 20—24%, Verschiedene Kohlenwasserstoffe 0—4%, Kohlensäure 5—8%, Stickstoff (aus der Luft) 61—64% als Rest. Es enthält also etwa 40% brennbare Gase, welche bei vollkommener Verbrennung etwas über 1300 Wärmeeinheiten entwickeln, so daß Dowsongas etwa den vierten Teil der Heizkraft guten Leuchtgases besitzt.

Abb. 976 stellt schematisch eine Kraftgas- (Dowsongas-) Anlage dar, wie sie von Gebrüder Körting (und auch ähnlich von der Deutzer Gasmotorenfabrik) ausgeführt wird. Der aufrechtstehende Schacht oder Generator G wird von oben durch die Füllvorrichtung E, welche im Betrieb durch einen Deckel mit Hebel und Kontregewicht geschlossen ist, mit dem zu vergasenden Brennstoff (Anthracit oder Koks) angefüllt; von unten wird durch den Rost mittels des Unterwindgebläses U überhitzter Dampf aus dem kleinen stehenden Dampfkessel D und Luft eingeblasen; die vordere unter dem Rost liegende Reinigungsthüre des Generators ist im Betriebe dicht geschlossen; der mit Luft vermischte Wasserdampf strömt also durch die hohe Schicht glühenden Brennmaterials im Generator. Zuerst wird der Generatorinhalt zur Inbetriebsetzung angeheizt und in lebhaftes Glühen gebracht; während dieser Zeit wird das erzeugte minderwertige Gas durch das Rohr A abgeführt; dann wird der Hahn in diesem Rohre geschlossen. Im weiteren Betriebe bleibt dann das Brennmaterial durch die fortwährende Luftzuführung im lebhaften Glühen. Das im Generator erzeugte Gas streicht zuerst durch einen Gegenstrom Luftkühler V, das Gasrohr ist von einem Mantelrohr umgeben, und durch den Zwischenraum zieht die vom Gebläse U angesaugte Luft, welche auf diese Weise vorteilhaft vorgewärmt wird. Die notwendige weitere Abkühlung geschieht durch

den Gegenstromwasserkühler C; das Gas strömt durch ein inneres Rohr von oben nach während sich in einem umgebenden Mantelrohre Kühlwasser befindet, welches unten eingeleitet wird und oben bei L abfließt. Von hier geht das Gas noch durch mehrere oder Reiniger (Scrubber) W_1, W_2, W_3, wo es von teerigen Bestandteilen befreit wi weit dies für den Betrieb von Motoren erforderlich ist, und gelangt dann durch den schieber S und den Wassertopf H in den Gasbehälter B, von dem es durch die Le den einzelnen Verbrauchstellen zugeführt wird. Die Wassertöpfe (Siphons) H und H_1 den Zweck, aus dem Gase ausscheidendes Wasser zu sammeln; dieselben werden von Zeit ausgepumpt. Um die Gaserzeugung dem Verbrauch anzupassen, wird, wenn de behälter gefüllt ist, durch die Behälterglocke mittels Kette und Rollen selbstthätig das ventil teilweise oder ganz geschlossen und die Gasproduktion vermindert oder ganz brochen, bis durch Sinken der Behälterglocke das Dampfventil wieder geöffnet wird.

Mit dem Dowsongasapparat werden aus 1 kg Generatorkohle von 7000 W einheiten etwa $4^1/_2$ cbm Gas von etwa 1300 Kalorien erzeugt, der Heizwert der wird hierbei mit 80—82% ausgenutzt. Mittelgroße Gasmotoren bester Konstr



976. Schematische Darstellung einer kleineren Kraftgasanlage.

in Verbindung mit einem solchen Dowsongasapparat brauchen für eine Pferdestärk Stunde Leistung 0,8 — 1 kg Brennmaterial. Wegen des geringeren Heizwerte Generatorgases gegenüber dem Leuchtgase ist die Leistung eines Gasmotors bei mit ersterem geringer als bei letzterem; es wird deshalb mit stärkerem Gasgemi arbeitet, und die Maschinen müssen für dieselbe Leistung größer konstruiert werden oben erwähnte 200pferdige Deutzer Motor des Baseler Wasserwerks ist für Betri Dowsongas eingerichtet und leistet mit diesem 160 Pferdestärken.

Benzin- und Petroleummotoren.

Bei der vielseitigen Verwendung und dem großen Erfolge, die die Gaskraftma gefunden haben, lag das Bestreben nahe, dieselben von dem Vorhandensein einer zen Gasversorgung unabhängig zu machen, nach Mitteln zu suchen, daß sie an jed liebigen Orte angewendet werden können. Dieses Bestreben hat dazu geführt, Kohlenwasserstoffe zum Betriebe der Gasmotoren zu verwenden. Die flüssigen die hier in Betracht kommen, sind einerseits die leichten und leichtflüchtigen Kohlen stoffe (von dem spezifischen Gewichte 0,7 und weniger) Benzin, Gasolin und dergl

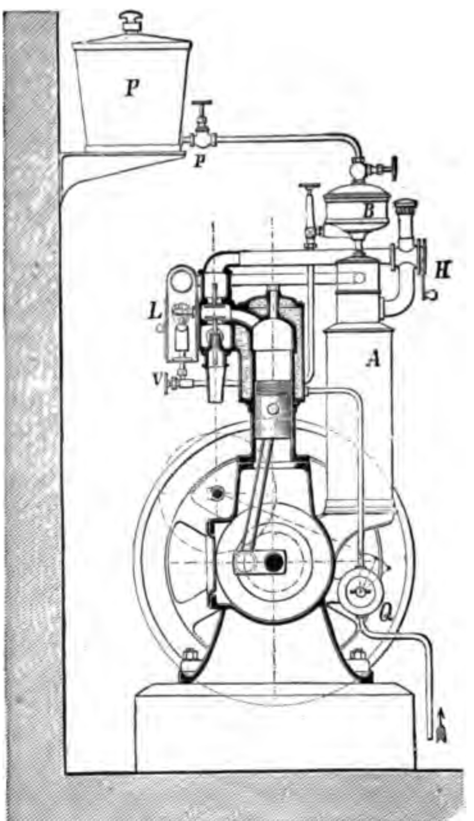
anderseits das schwerere gewöhnliche Petroleum; letzteres verdunstet schwer und ist schwerer entzündbar, bietet dadurch in der Anwendung mehr Schwierigkeit, ist aber auch weniger feuergefährlich. Alle Maschinen die mit diesen Stoffen betrieben werden, unterscheiden sich grundsätzlich gar nicht von der Gasmaschine. Anstatt Leuchtgas aus der Leitung zu entnehmen, wird erst aus Benzin oder Petroleum Gas erzeugt. Bei Verwendung des ersteren wird Luft durch ein brausenartig erweitertes Rohr in ein Gefäß mit Benzin geleitet, die Brause taucht in dieses ein, und die Luft muß in fein verteilten Bläschen das Benzin durchstreichen; hierbei sättigt sie sich derart mit Dämpfen desselben, daß nach weiterer Mischung mit Luft ein explosives Gasgemenge entsteht. Petroleum wird durch einen Zerstäuber fein verteilt mit Luft vermischt, bei der schweren Verdunstbarkeit desselben ist es dann aber noch nicht gasförmig, sondern ein feiner Nebel aus vielen feinen Tröpfchen; das Gemenge wird deshalb noch erst über heiße Metallflächen geleitet; hierbei verdampft das Petroleum und bildet nun mit der entsprechenden Menge zugemischter Luft ein Gasgemenge, welches im Arbeitscylinder des Motors ebenso wirkt, wie Leuchtgasgemisch.

Die Konstruktion der neueren Petroleum- und Benzinmotoren ist die gleiche wie die der Gasmotoren; die Gasmotoren der meisten Fabriken können durch eine kleine Änderung auch für Betrieb mit Petroleum u. s. w. eingerichtet werden; es wird nur die Gaseinführung und die Zündvorrichtung abgeändert und die Einrichtung zur Erzeugung des Benzin- oder Petroleumdampfes hinzugefügt.

Die ältesten Versuche mit solchen Maschinen scheinen in Amerika gemacht worden zu sein; in Europa wurden sie in weiteren Kreisen erst bekannt durch den ersten sogenannten Petroleummotor von Hock in Wien 1873, also lange bevor der epochemachende neue Ottosche Motor das Licht der Welt erblickte; sie war aber auch schon vorher wieder verschwunden und fast vergessen. Die Bezeichnung Petroleummaschine für diese und spätere Konstruktionen war unrichtig, denn thatsächlich konnten dieselben nicht mit Petroleum, sondern nur mit den erwähnten leichten Kohlenwasserstoffen Benzin, Gasolin, Ligroin und dergleichen betrieben werden; wirklich brauchbare Petroleummaschinen für gewöhnliches Lampenpetroleum gibt's erst seit etwa Mitte der neunziger Jahre. Gegen Ende der siebziger Jahre, nach dem Erscheinen des direkt wirkenden Deutzer Gasmotors, glaubte man in den damals vielfach auftauchenden Gaserzeugungsapparaten das Mittel gefunden zu haben, die Gaskraftmaschinen von städtischen Gaswerken unabhängig zu machen. Bei diesen Apparaten wurde die schon oben berührte Eigenschaft der Luft, mit den Dämpfen von leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffen eine mit leuchtender Flamme brennende Mischung zu bilden, benutzt, indem man Luft durch mit Gasolin getränkte Wolle streichen ließ. Bald aber stellte sich die Unzuverlässigkeit und hohe Feuergefährlichkeit dieser Apparate heraus, und die Techniker wandten sich wieder der Konstruktion von Motoren zu, mit denen die direkte Verwendung von Gasolin und Benzin ermöglicht werden sollte. Etwa seit Anfang der achtziger Jahre gingen die meisten Gasmotorenfabriken dazu über, solche Motoren zu bauen. Lange Zeit besaßen dieselben manche Mängel; sie waren im Betriebe nicht zuverlässig, sondern blieben öfter ohne sichtbare Veranlassung stehen und waren auch im hohen Grade feuergefährlich. In neuester Zeit aber sind diese Motoren sehr verbessert worden, besonders ist die Feuersgefahr bei den besseren Maschinen und guter Anordnung auf ein geringes Maß beschränkt worden. Bei Benzinmotoren wird vielfach, um in der Nähe des Motors gar keine Flamme zu haben, anstatt der Flammenzündung elektrische Funkenzündung im Kraftcylinder angewendet; ferner wird der Benzinvorratsbehälter mit dem Verdampfungsapparat in einem besonderen Raume, außerhalb des Motorraumes aufgestellt, der nicht mit Licht zu betreten ist. Die Benzinbehälter werden als vollkommen dichte eiserne Fässer hergestellt, und durch eine kleine Flügelpumpe wird die erforderliche Benzinmenge in den Verdampfungsapparat gepumpt, so daß das Benzin gar nicht mit der Luft in Berührung kommt. Ebenso sind die Petroleummotoren sehr verbessert worden, und diese Art Maschinen bieten jetzt dem Kleingewerbe an Orten, wo kein Leuchtgas vorhanden ist, eine bequeme zuverlässige und verhältnismäßig billige und gefahrlose Betriebskraft. Das zum Betrieb notwendige Petroleum wird in einem luftdicht abgeschlossenen eisernen Behälter auf der Maschine selbst untergebracht; es wird vor Eintritt in den

Cylinder verdampft, und zu diesem Zweck muß die Maschine zur Inbetriebsetzung v angewärmt werden. Die Zündung geschieht durch ein Glührohr, zu dessen Erh ebenfalls Petroleum verwendet wird. Ebenso wie die Gasmotoren sind die Petro motoren mit Geschwindigkeitsregulatoren versehen, welche einerseits einen regelmä Gang herbeiführen, anderseits den Verbrauch an Petroleum der von der Maschi leisteten Arbeit anpassen. Wo indessen Gas vorhanden ist, sind im allgemeinen Gasmotoren vorzuziehen; bei denselben bringt die Verwendung des fertigen Betr mittels eine größere Einfachheit, insbesondere bei der Inbetriebsetzung mit sich, u fällt die Heranschaffung, Aufbewahrung Füllung des Betriebsmittels fort.

Was nun die beiden Arten dieser toren betrifft, so sind Benzinmotoren im trieb reinlicher, sie brauchen weniger fältige Wartung wie Petroleummotoren



977. Schnitt durch Daimlers Benzinmotor.



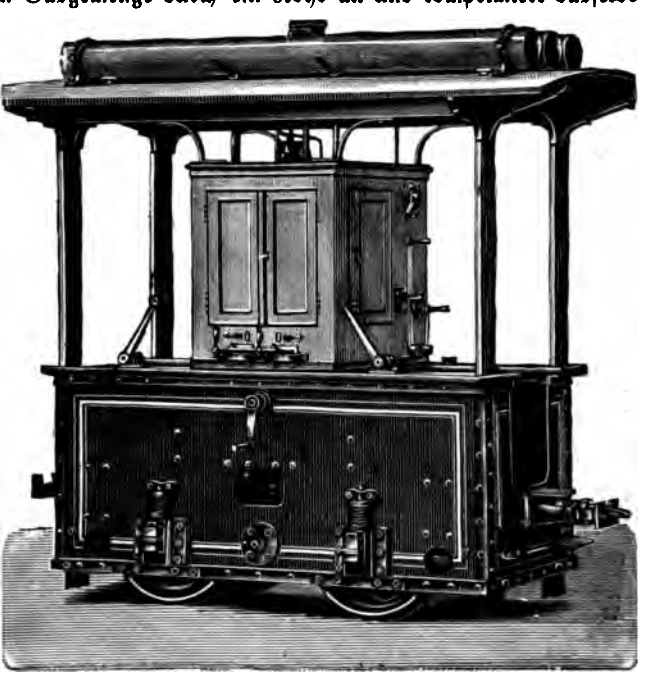
978. Ansicht von Daimlers Benzin

letzteren ist aber das Betriebsmittel weniger feuergefährlich, und das gewöhnliche Lam petroleum des Handels ist bequemer zu beschaffen.

Der Verbrauch an Brennmaterial bei diesen Motoren beträgt etwa $^1/_2$ kg effektive Pferdekraft und Stunde.

Ebenso wie die Konstruktion ist auch das Aussehen der Petroleum- und Be motoren der meisten Fabriken fast genau dasselbe, wie das der Gasmotoren der betreffe Fabrik; sie werden in stehender und liegender Anordnung für gewöhnlich von 1—12 Pf stärken ausgeführt. Zu den ersten Erfindern von Motoren in Deutschland gehört Ingenieur G. Daimler in Cannstatt, dessen Konstruktionen von der Daimlerschen Moto gesellschaft zu Cannstatt seit längerer Zeit mit steigendem Erfolge ausgeführt we Die Motoren können ebenso, wie die Deutzer, Körtingschen und anderen, auch als motoren arbeiten. Besonders aber für Benzinbetrieb sind sie von dieser Firma fü verschiedensten Verwendungszwecke ausgebildet worden. Die Konstruktion des gew lichen Daimlerschen stehenden Motors für Gewerbebetrieb zeigt Abb. 977, wäh

Abb. 978 eine Ansicht desselben gibt. P ist der Benzinbehälter, aus dessen Absperrventil p durch ein Rohr dem Verdampfungsapparat A B so viel Benzin zugeführt wird, bis A etwa $^2/_3$, bis zu einer Marke, gefüllt ist. B ist eine Lampe, welche zuerst ganz gefüllt wird, ehe Benzin nach A übertritt. Von der Lampe B aus wird durch ein Röhrchen mit Ventil V dem in einem Gehäuse L befindlichen Brenner Benzin zugeführt; es strömt aus der engen Brennermündung in einem feinen Strahle aus, der durch die hohe Temperatur des Brenners und des Mantels E während des Betriebes sofort verdampft; die Flamme brennt um einen Platinzünder herum und macht diesen glühend. In dem Verdunstungsapparate A werden mittels Hindurchsaugens vorerwärmter Luft durch das Benzin Dämpfe entwickelt, welche sich in dem einstellbaren Regulierhahn H nochmals mit Luft mischen und so das richtige brennbare Gasgemenge erzeugen. Der Arbeitskolben saugt beim Niedergange von diesem Gasgemenge durch ein Rohr an und komprimiert dasselbe beim Aufwärtsgehen in dem in der Abbildung sichtbaren Verdichtungsraume des Cylinders. In der höchsten Stellung des Kolbens, also im toten Punkte, wird durch die Steuerung die Verbindung mit dem glühenden Platinzünder hergestellt, die Ladung verpufft und die Verbrennungsgase arbeiten in bekannter Weise durch Expandierung auf den Kolben. Zur Entwickelung der Benzindämpfe muß die Luft, wie schon angedeutet, vorerwärmt werden; dies geschieht dadurch, daß sie vor dem Eintritt in den Verdampfer durch die Brennerlaterne geführt wird, hier die überflüssige Hitze des Brenners aufnimmt und noch eine Ummantelung des Auspuffrohres passieren muß.



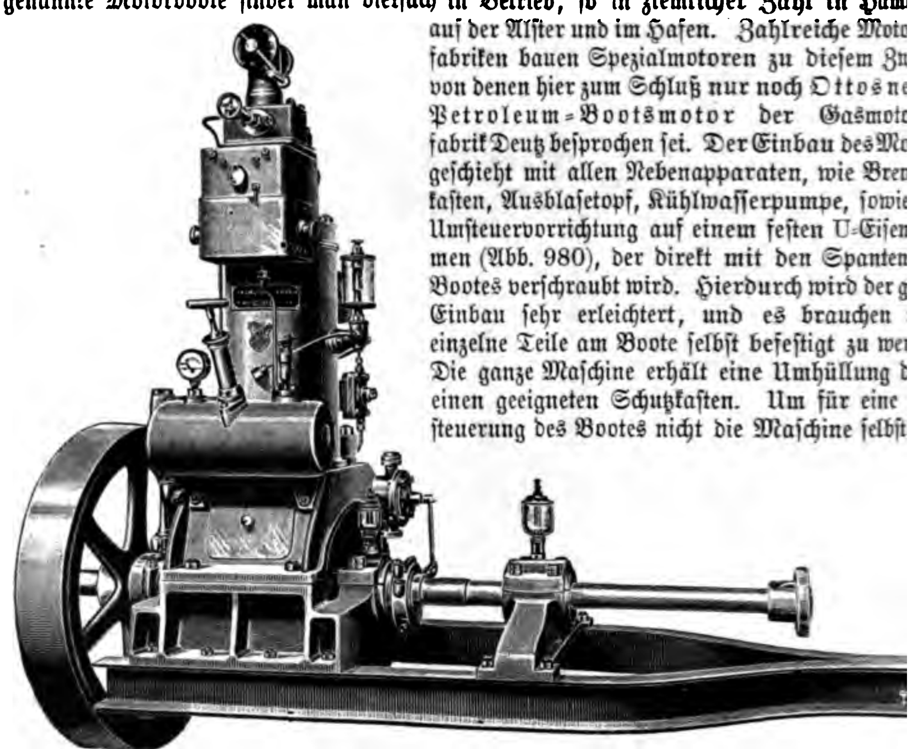
979. Daimlers Benzinlokomotive.

Zur Inbetriebsetzung des Motors wird zunächst nach Füllung von A und B das Brennerventil V geöffnet und das Brennerröhrchen etwa eine Minute lang von außen angewärmt; hierdurch wird die nötige Temperatur erzeugt, um die zur Bildung der Brennerflamme erforderlichen Gase im Brenner selbst zu erzeugen. Wenn der Zünder rotglühend geworden ist, öffnet man das Ventil V und dreht mit der Hand durch die in der Abbildung unten rechts sichtbare Kurbel den Motor an; nach einigen Drehungen wird die erste Verbrennung im Arbeitscylinder stattfinden, worauf der Motor in Gang kommt und selbstthätig die Kurbel ausschaltet. Der Arbeitscylinder ist, wie bei allen Gasmotoren, von einem Kühlmantel umgeben, durch welchen aus der Wasserleitung oder mittels der von dem Motor selbst betriebenen kleinen Pumpe Q Kühlwasser geleitet wird.

Außer für stationäre Betriebe findet der Daimlersche Motor zu den verschiedensten anderen Zwecken Anwendung. Man baut auf Fahrgerüst transportable Motoren, Benzinlokomobilen, für Zwecke, wo an verschiedenen Stellen Arbeit geleistet werden soll; dieselben finden an Stelle der gewöhnlichen Lokomobilen vorteilhaft da Anwendung, wo schnelle Betriebsbereitschaft bei häufig unterbrochenem Arbeitsbedarf von Wert ist z. B. für landwirtschaftliche Zwecke. Eine solche Maschine ist in drei Minuten in Betrieb gesetzt, während eine gewöhnliche Lokomobile erst angeheizt werden muß. Daimler ist auch einer

der ersten gewesen, die versucht haben, Gas- oder Benzinmotoren zum Betriebe von Ei
bahnfahrzeugen zu benutzen; in den achtziger Jahren lief versuchsweise ein Benzinm
wagen auf der Kirchheimer Eisenbahn in Württemberg. Eine Daimlersche Be
lokomotive ist in Abb. 979 dargestellt. Auch Straßenfuhrwerke zum Personentrans
mit Petroleummotoren hat die Daimler-Motoren-Gesellschaft gebaut, welche sich allerd
bisher anscheinend noch nicht in ausgedehnterem Maße eingeführt haben.

Eine in neuester Zeit sich ausdehnende Anwendung haben die Petroleummot
zum Betriebe von kleineren Schiffen, Fährbooten, Pinassen u. s. w. gefunden.
genannte Motorboote findet man vielfach in Betrieb, so in ziemlicher Zahl in Ham
auf der Alster und im Hafen. Zahlreiche Moto
fabriken bauen Spezialmotoren zu diesem Zw
von denen hier zum Schluß nur noch Ottos ne
Petroleum-Bootsmotor der Gasmoto
fabrik Deutz besprochen sei. Der Einbau des Mo
geschieht mit allen Nebenapparaten, wie Bren
kasten, Ausblasetopf, Kühlwasserpumpe, sowie
Umsteuervorrichtung auf einem festen U-Eisen
men (Abb. 980), der direkt mit den Spanten
Bootes verschraubt wird. Hierdurch wird der g
Einbau sehr erleichtert, und es brauchen
einzelne Teile am Boote selbst befestigt zu wer
Die ganze Maschine erhält eine Umhüllung d
einen geeigneten Schutzkasten. Um für eine
steuerung des Bootes nicht die Maschine selbst



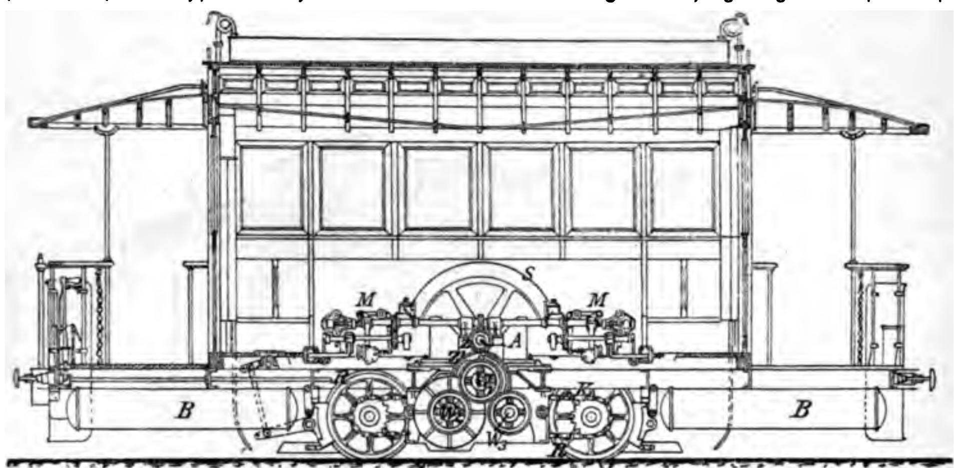
980. Ottos neuer Petroleum-Bootsmotor.

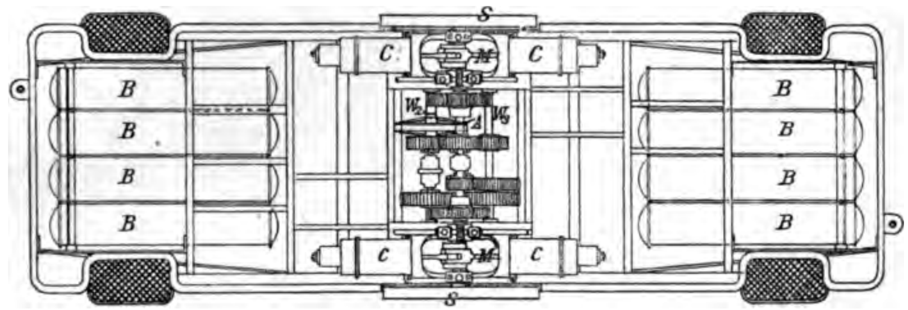
halten und umsteuern zu brauchen, was bei dieser Art Motoren (und auch bei Gasmot
nicht nur eine komplizierte Steuerungskonstruktion verlangen würde, sondern auch im Be
lästig wäre, da ja die Maschine nach jedesmaligem Stillsetzen wieder durch äußere Kr
Gang gesetzt werden müßte, werden bei den Motorbooten meist Drehflügelschrauben
gewendet; bei denselben wird das Vor- und Rückwärtsfahren dadurch erreicht, daß man
Umdrehen der Flügel während der Fahrt die Schraube als rechtsgängige oder als l
gängige wirken läßt. Durch entsprechende Einstellung der Flügel kann auch die Geschwind
reguliert werden, wobei der Motor gleichmäßig mit unveränderlicher Umdrehungszahl l
In der Mittelstellung der Schraubenflügel steht das Boot bei weiterarbeitendem Motor

Eine neuere, interessante und vielversprechende Anwendung der Gaskraftmasch
ist diejenige für Straßenbahnen. Der Gedanke, den Gasmotor zum Betrieb von F
zeugen zu verwenden, wurde schon bald nach seiner Erfindung in Erwägung gezo
schon ein Jahr nach derselben wurden zwei deutsche Patente auf Gaslokomotiven
gesucht und erteilt, und auch im Auslande wurden solche Konstruktionen patentiert.
mals war eine Gaslokomotive, nicht ein Straßenbahnwagen, das Ziel der Erfinder;
suchte damals eifrig nach einem Ersatz für die kleineren Dampflokomotiven. Doch
in den nächsten Jahren kam der Gedanke auf, den Motor anstatt einer vorzuspanne

Lokomotive auf dem Wagen selbst unterzubringen, und eine größere Anzahl von Erfindern arbeitete in der Folgezeit an der konstruktiven Ausgestaltung dieses Gedankens. Im Jahre 1892 trat der Ingenieur Lührig mit einem von ihm konstruierten Gas-Straßenbahnwagen an die Öffentlichkeit; im folgenden Jahre kam ein Versuchswagen auf der Dresdener Straßenbahn in Betrieb; derselbe erregte in weiteren Kreisen viel Aufsehen und bedeutet den erfolgreichen Anfang des Gasbetriebes für Straßenbahnen.

Jeder Gasmotorwagen führt das Betriebsgas in komprimiertem Zustande (mit sechs Atmosphären Pressung) in einer Anzahl eiserner Behälter mit sich, deren Gesamtinhalt $1\frac{1}{4}$—$2\frac{1}{2}$ cbm beträgt. Zur Komprimierung des Gases ist eine kleine Kompressorstation erforderlich, in welcher das Gas aus der Leitung mit sehr geringem Kraftbedarf



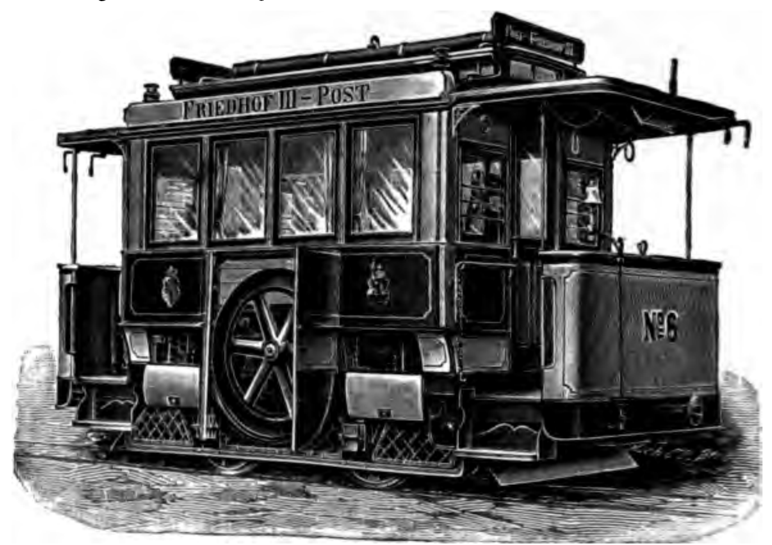


981 u. 982. Gasmotor-Straßenbahnwagen.

durch Pumpen mit acht Atmosphären Spannung in einen Vorratsbehälter gedrückt wird; aus diesem werden in einfachster Weise und in sehr kurzer Zeit die Wagenrezipienten mit sechs Atmosphären Spannung gefüllt. Die Abb. 981 und 982 zeigen die Anordnung der Motoren und des Getriebes bei einem Lührigschen Motorwagen. Derselbe wird durch zwei Deutzer Zwillingsmotoren M M betrieben, welche an den Längsseiten unter den Sitzbänken liegen; bei den speziell für diesen Zweck von der Gasmotorenfabrik Deutz konstruierten Motoren liegen entgegen der üblichen Anordnung die beiden Cylinder C C einander gegenüber, um an Breite zu sparen. Die beiden Schwungräder S S liegen außen hinter den Sitzlehnen und sind durch Blechwandungen verkleidet. Das Betriebsgas geht, ehe es aus den Rezipienten B B nach den Maschinen gelangt, durch Druckregulatoren, welche den Druck auf 30—40 mm Wassersäule herabmindern. Auf dem Dach des Wagens liegen die Behälter für das Kühlwasser; durch selbstthätige Zirkulation gelangt dasselbe aus den Cylindermänteln wieder in die Behälter zurück, wobei es sich abkühlt, so daß eine häufigere Erneuerung nicht erforderlich ist. Der Auspuff der Motoren geht aus den Cylindern zunächst in einen Schalldämpfer und dann durch einen

auf dem Dache liegenden Kondensationsapparat, aus welchem die Verbrennungsp welche bei Gasmotoren bekanntlich nur aus Kohlensäure und Wasser bestehen, als Rauch und Ruß verursachen, geräuschlos und fast geruchlos in die Luft entweich

Durch eine vom Wagenlenker mittels Tritthebels zu bedienende Steuerung die Motoren auf drei verschiedene Geschwindigkeiten, 150 Umdrehungen pro Mi den Leerlauf, 200 für langsame und 240 für schnelle Fahrt eingestellt werden; be Fahrtunterbrechungen an den Halte- und Endstellen laufen die Motoren mit 150 leer, wodurch das jedesmalige Andrehen der Schwungräder zum Ingangsetzen ve wird. A ist die gemeinschaftliche Welle beider Motoren; dieselbe treibt durch di räder $Z Z_1$ die erste Triebwelle W_1 an, von welcher durch eine ausrückbare kuppelung und zwei Paar Zahnräder von verschiedenem Übersetzungsverhältnis wegung auf die seitliche Welle W_2 übertragen wird, und zwar je nach dem Zahnräd welches in Eingriff gebracht wird, auf langsamen oder schnellen Gang. Die anderen Seite liegende Welle W_3 ist die eigentliche Triebwelle; dieselbe wird du



983. Gas-Straßenbahnwagen der Gasbahn-Gesellschaft in Dessau.

zweite Klauenkuppelung bezw. weitere Zahnräderpaare in Vorwärts- oder Rück bewegung gebracht. Von dieser Triebwelle aus wird die Bewegung durch zwei G Gelenkketten K auf die Achsen der Räder R R übertragen. Der Antrieb der Tri erfolgt durch eine Reibungskuppelung, welche vom Wagenlenker mittels Handrad oder ausgeschaltet wird; mit diesem Mechanismus sind noch die Bremsen derart ver daß sie sofort angreifen, wenn die Kuppelung ausgeschaltet ist, und umgekehrt ehe werden, als die Kuppelung eingerückt wird und die Räder in Bewegung setzt. Der führer hat also einen Tritthebel für die Regulierung der Geschwindigkeit der M zwei Handhebel zum Einrücken der beiden Klauenkuppelungen und das Handrad Reibungskuppelung und die Bremsen zu bedienen. Mit Hilfe dieser Steuervorrich kann jedes Fahrmanöver, Anfahren, Langsam- oder Schnellfahren, plötzliches A und Rückwärtsfahren leicht und sicher ausgeführt werden. Die Fahrgäste spüre Fahren vom Arbeiten der Maschinerie nichts; nur wenn beim Stillstehen die M leer laufen, hört man ein geringes Geräusch.

Im Jahre 1894 wurde in Deutschland die erste Gas-Straßenbahn in Dessa geführt; dieselbe ist seitdem mit zwei Komprimierstationen, 4,4 km Linienlänge und Motorwagen System Lührig in Betrieb und funktioniert in jeder Hinsicht, sow technischer Beziehung wie bezüglich der wirtschaftlichen Ergebnisse zur vollsten Zufried Abb. 983 stellt einen der dortigen Motorwagen mit geöffneter Thür zum Schwungra

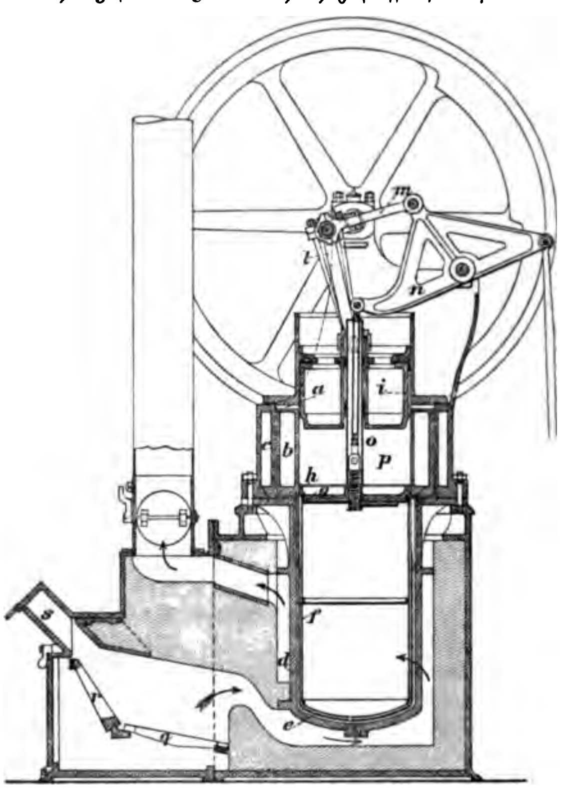
Die Heißluftmaschinen.

Diese Art kalorische Maschinen hat vor 60 Jahren eine kurze Zeit lang sehr viel Aufsehen erregt; man glaubte in derselben das Ideal der Kraftmaschinen gefunden zu haben und hielt sie sogar für eine Lösung des Problems des perpetuum mobile. Jetzt hat die Heißluftmaschine kaum noch Bedeutung für die Technik; sie hat anderen Kraftmaschinen, besonders den Gas- und Petroleummotoren weichen müssen. Ihre Erfindung und Ausbildung bietet indessen manches Interessante, weshalb sie hier eine kurze Besprechung finden mag. Das Prinzip, welches den verschiedenen Heißluftmaschinen zu Grunde liegt, ist sehr einfach, viel einfacher als dasjenige der Dampfmaschinen: es beruht auf der Ausdehnung und Zusammenziehung von Luft durch Erwärmung und Abkühlung.

Als Erfinder der Heißluftmaschine muß der Schwede John Ericsson gelten, wenn auch schon vor ihm John Sterling in Glasgow 1827 eine Luftexpansionsmaschine konstruiert hatte, welche keinen Erfolg hatte. Ericsson war Genieoffizier in der schwedischen Armee; sein erfinderischer Geist befaßte sich besonders mit der Aufgabe, eine Wärme-Kraftmaschine zu konstruieren, in der die Wärme ökonomischer ausgenutzt würde, als bei den Dampfmaschinen, da er wohl erkannte, daß mit der bisherigen Verwendung des Wasserdampfes untrennbar ein großer Wärmeverlust verbunden war. Er glaubte ein anderes gleichwertiges Mittel, die überall kostenlos vorhandene Luft, an Stelle des Dampfes setzen zu können und konstruierte eine Luftmaschine, fand aber in seiner Heimat nicht die notwendige Unterstützung für seine Ideen und wandte sich deshalb nach England; 1833 stellte er seine erste fünfpferdige Luftmaschine in London auf. Dieselbe erregte außerordentliches Aufsehen; nach den Angaben Ericssons schien dieselbe die geglückte Konstruktion des perpetuum mobile darzustellen. Die Konstruktion der Maschine und seine Auffassung über die Wirksamkeit derselben mußten zu dieser Annahme führen, wenn auch der Erfinder selbst gegen diese Bezeichnung protestierte. Es ist hierzu zu bemerken, daß damals die mechanische Wärmetheorie noch unbekannt war, daß Wärme noch als ein feiner, unwägbarer Stoff galt, der in allen Körpern enthalten sei und denselben bei Temperaturveränderungen zugeführt oder entzogen werde. Die Wirkungsweise der Maschine war folgende. Eine Luftpumpe drückte atmosphärische Luft mit gewisser Pressung in einen Behälter; aus demselben gelangte sie in einen mit Kolben versehenen Arbeitscylinder, passierte aber vorher den „Regenerator“, den eigentlichen charakteristischen Teil der Maschine. Der Arbeitscylinder wurde durch Feuerung erhitzt. Die gepreßte Luft dehnte sich durch Wärme aus und drückte Arbeit leistend auf den Kolben. Beim Rückgange des Kolbens entwich die Luft ohne Spannung, aber noch heiß, durch den Regenerator, ein dichtes Drahtgewebe von sehr großer metallischer Oberfläche, ins Freie; hierbei sollte sie ihre gesamte Wärme, die ihr durch die Feuerung zugeführt war, an diesen abgeben. Beim folgenden Hub sollte die gepreßte Luft aus dem Behälter beim Durchstreichen des Regenerators diese Wärme wieder aufnehmen und durch die hierdurch bewirkte Spannungserhöhung im Cylinder Arbeit leisten, ohne daß neue Wärmezufuhr nötig wäre; die Feuerung sollte nur dazu dienen, die unvermeidlichen Wärmeverluste durch Strahlung und unvollkommene Wirkung des Regenerators zu ersetzen; letzterer aber wurde als der eigentliche Kraftspender angesehen. Das Falsche in dieser ganzen Anschauung liegt für uns auf der Hand. Gewiß konnte die Maschine Arbeit leisten, aber nur durch die Heizung des Cylinders; die hierdurch der Luft zugeführte Wärmemenge wurde bei der Expansion teilweise in mechanische Arbeit umgewandelt, ging also als Wärme für die Wahrnehmung verloren, und nur der Rest der Wärme wurde beim Austreten der Luft in dem Regenerator aufgespeichert. Letzterer hatte eine ganz gute Wirkung, indem die frische Luft vorerwärmt wurde, wodurch Brennmaterial erspart wurde, ebenso wie man die zurückbleibende Wärme im Abdampf von Dampfmaschinen zur Erwärmung des Speisewassers nutzbar macht.

Bei der kleinen Versuchsmaschine wurden thatsächlich wenig Kohlen verbraucht. Ein Dampfkessel fehlte, und sie leistete Arbeit; das Verhältnis der Arbeitsleistung zum Kohlenverbrauch wurde freilich nicht festgestellt. Die technische und wissenschaftliche Welt stand

vor einem Rätsel. Der berühmte Physiker Faraday wollte anfangs in einem öffen
Vortrage die Möglichkeit der Wirkung der Maschine bestreiten, da ihm die Unmögl
eines perpetuum mobile klar war; als er aber die Maschine in Thätigkeit gesehen
mußte er erklären, daß dieselbe Arbeit leiste, er aber nicht wisse, woher. Man gl
nun, daß bei großen Maschinen von mehreren hundert Pferdekräften nach dem P
dieser Versuchsmaschine bedeutende Vorteile zu gewinnen seien. Ericsson wandte sich,
dem seine Bemühungen in England nicht genügende Unterstützung fanden, nach
amerika, wo er mit offenen Armen empfangen wurde und thatkräftige Unterstützun
Regierung und von Privaten fand. Als ihm hier die nötigen Mittel für die Ve
lichung seiner Idee reichlich zuflossen, konstruierte er 1852 zwei angeblich 1000pf
Riesen-Luftmaschinen für einen g
Ozeandampfer; die Maschinen fu
nierten in der That, wenn auc
erheblich geringerer Leistung, al
wartet, aber die Hauptgrundlag
ganzen Idee erwies sich als falsch
Maschinen brauchten Kohlen e
gut wie Dampfmaschinen, und
Cylinder mußten fortwährend i
kräftigsten Weise unterfeuert we
wenn die gewünschte Geschwind
des Schiffes erzielt werden s
Das war für Ericsson eine bittere
täuschung; hätte er damals schon e
von dem Prinzip der Erhaltung
Kraft gewußt, hätte er mit dem
fachen deutschen Arzt in Heilbron
Verbindung gestanden, der schon
zehn Jahren den Zusammen
zwischen Wärme und mechani
Arbeit erkannt hatte, dann wäre
diese Enttäuschung und noch viel
nütze weitere Arbeit erspart gebli
Er arbeitete aber an seiner Idee
verzagt weiter und bildete unter
zichtleistung auf ein Konkurrieren
großen Dampfmaschinen, seine H
luftmaschine als Kleinmotor aus,
sie sich in der That durch die Ge



984. Lehmanns neue Heißluftmaschine (Durchschnitt).

losigkeit ihres Betriebes gegenüber den Dampfmaschinen eignete.

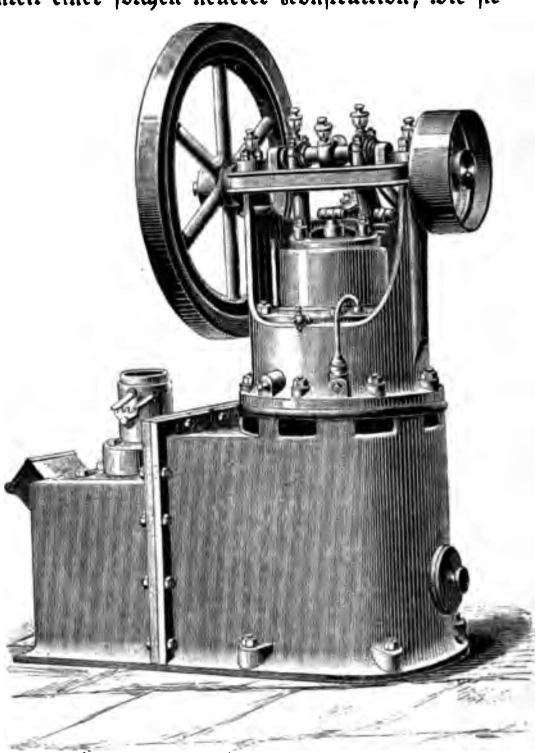
In Europa waren seine Maschinen schon vor dem erwähnten großen Mißer
zuerst auf der Londoner Ausstellung 1851 im Betrieb gezeigt worden.

Die Ericssonsche Heißluftmaschine, welche gegen Ende der fünfziger Jah
der ganzen Welt bekannt und eingeführt wurde, hatte gegen seine früheren Konstrukti
bedeutende Verbesserungen.

Alle Heißluftmaschinen teilt man ein in offene und geschlossene; die ersteren
solche, bei denen durch eine von der Maschine selbst betriebene Luftpumpe bei jedem
dem Arbeitscylinder frische Luft zugeführt wird, welche erwärmt wird und, nachdem
die durch diese Erwärmung aufgenommene Energie durch Expansion an den Arbeitsk
abgegeben hat, aus der Maschine entweicht; bei den geschlossenen Maschinen wird
gegen dieselbe Luftmenge abwechselnd erwärmt und abgekühlt. Beide Arten werden
ausschließlich einfachwirkend konstruiert; sie haben, wie Gasmotoren, ein kräftiges Schw
bar, welches der Maschine über den nicht wirksamen Hub forthilft. Die vorher beschrie
erste Ericssonsche Maschine war eine offene; die späteren Ericssonschen Kleinmotoren w

dagegen geschlossene Maschinen, sie wurden in liegender und stehender Anordnung konstruiert. Diese Maschinen besaßen noch manche Mängel: die Ausnutzung des Brennmaterials war sehr ungenügend, weil die Luft noch zu warm aus der Maschine entwich; der Schmierverbrauch war wegen der hohen Temperatur der zu dichtenden Teile ein großer, die Maschinen arbeiteten nicht ruhig genug, die Hebelwerke und Ventile schlugen stark. Verschiedene Verbesserungen vermochten wohl diese Übelstände zu vermindern, aber nicht zu beseitigen.

Die Techniker gaben indes die Bemühungen nicht auf, nach dem Ericssonschen Vorbild durch andere Konstruktionen einen besseren Heißluft-Kleinmotor zu schaffen, und es sind mehrere brauchbare Maschinen konstruiert worden. Am bekanntesten und in Deutschland am meisten eingeführt worden ist die **Lehmannsche neue Heißluftmaschine**. Die Anordnung und Wirksamkeit einer solchen neuerer Konstruktion, wie sie von der Berlin-Anhaltischen Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft zu Berlin-Moabit und Dessau ausgeführt wird (oder bis vor einigen Jahren ausgeführt worden ist) sei an der Schnittzeichnung Abb. 984 dargelegt; Abb. 985 zeigt eine Maschine in der Ansicht.

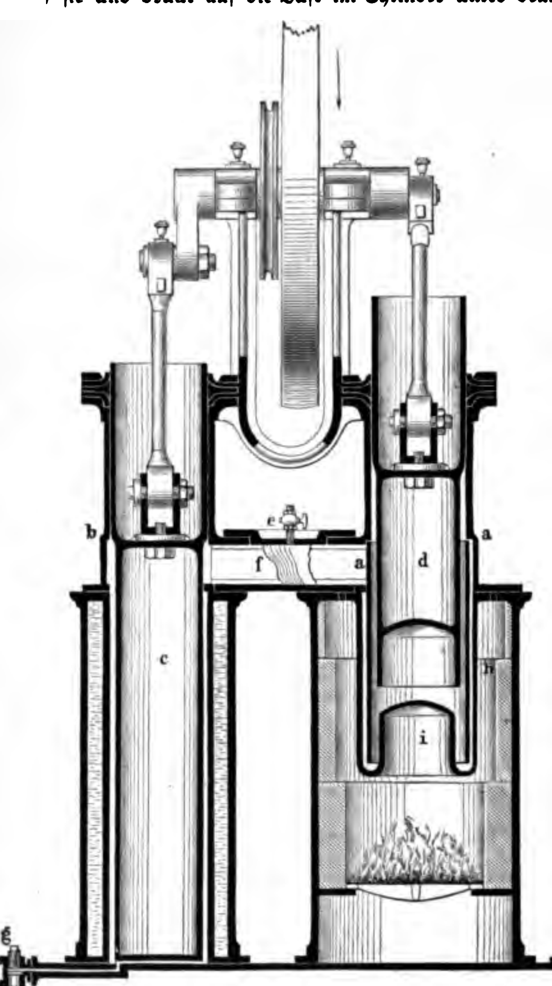


985. Lehmanns Heißluftmaschine (Ansicht).

Die Schnittzeichnung Abb. 984 stellt eine stehende Maschine zum Betriebe einer Pumpe dar; von dem Kurbelzapfen aus wird direkt ein Kunstkreuz (Winkelhebel), an welches die Triebstange der Pumpe angehängt ist, angetrieben. Die Ansichtszeichnung zeigt dagegen einen Motor für Gewerbebetrieb, mit Riemenantriebsscheibe. Die Einrichtung der Maschine ist folgende. Ein senkrechter, aus zwei Stücken zusammengesetzter, oben offener gußeiserner Cylinder P hat am oberen Ende zwei Ringmäntel b und c, in denen Kühlwasser zirkuliert; ein ringförmiger Raum zwischen denselben steht durch Kanal a mit dem Cylinderinnern in Verbindung. Der untere Teil des Cylinders ist der Feuertopf d; derselbe ist in einen Ofen gemauert, r q ist der Rost desselben, s die Einschüttöffnung für das Brennmaterial. Die Heizgase umstreichen, wie die Pfeile anzeigen, den Feuertopf, denselben bis zur Rotglut erhitzend, und ziehen durch einen mit Zugregulierklappe versehenen Schornstein ab. Der äußere Feuertopf d hat einen inneren eingesetzten Schutzmantel oder Glühtopf e; zwischen beiden ist ein Ringkanal frei, der mit dem erwähnten Kanal zwischen den beiden Kühlmänteln c und b in Verbindung steht und anderseits durch Öffnungen in dem unteren Boden des Glühtopfes e mit dem Cylinderinnern korrespondiert. In dem oberen Teile des Cylinders bewegt sich ein Kolben i, welcher durch zwei Pleuelstangen l auf die Kurbel der Schwungradwelle wirkt. Durch den Kolben ist ein langes Stopfbüchsenrohr dicht hindurchgeführt, welches sich zwischen den zwei beiderseits an Zapfen sitzenden Pleuelstangen auf und ab bewegen kann. Durch dieses Rohr bezw. die in und mit demselben sich bewegende Stange O wird von der Kurbel aus mittels der Stange m und des Kreuzes n der im Innern des Cylinders unter dem Kolben befindliche lange, hohle, ganz dicht geschlossene Blechcylinder f g, der **Verdränger**, bewegt, dessen Durchmesser etwas kleiner ist, als der innere Cylinderdurchmesser; derselbe wird durch das erwähnte, mit ihm fest verbundene Stopfbüchsenrohr im Kolben genau vertikal geführt. Der Verdränger ist am oberen Ende durch eine Scheibe g mit eingelegtem Dichtungsring h gegen den Cylinder abgedichtet. Bei dem Auf- und Abgehen des Verdrängers wird die in der Maschine eingeschlossene Luft abwechselnd nach dem heißen Feuertopf und nach dem oberen gekühlten Teile des Cylinders gedrängt. Die Luft geht hierbei durch die erwähnten Kanäle a a aus dem Cylinder und zwischen den beiden Kühlmänteln c b nieder; weiter nimmt sie den Weg zwischen äußerem Feuertopf d und dem inneren Schutzmantel, nimmt hierbei Wärme an der inneren Fläche des glühenden äußeren Feuertopfes und an der äußeren Fläche des inneren Mantels auf

und tritt in erhitztem Zustande durch den durchlöcherten Boden des Glühtopfes
Cylinder unter den Verdränger.

Die Wirkungsweise ist nun folgende. Der Verdränger und der Arbeitskolben mach
ihren Hub gleichzeitig, sondern sie bewegen sich relativ gegeneinander, indem der Verd
dem Arbeitskolben stets etwa um $^3/_4$ eines Hubes voraus ist; er hat während eines großen
seiner Bewegung einen der Bewegung des Arbeitskolbens entgegengesetzten Lauf. Währ
Aufwärtsbewegung des Verdrängers gelangt die kalte Luft von dem oberen Teile des Cy
auf dem beschriebenen Wege nach dem Feuertopfe und wird hier erhitzt, infolgedessen exp
sie und drückt auf die Luft im Cylinder unter dem Arbeitskoben und so auf diesen selb
oben; beim Niedergehen des Verdr
tritt die heiße Luft in den oberen T
Cylinders; sie wird hier durch die
mäntel abgekühlt und zieht sich zus
so daß der Druck auf den Kolbe
gehoben wird, und dieser durch se
wicht und die lebendige Kraft des Sc
rades niedergeht. In der Zeichnu
wegt sich in der Bildebene das Sc
rad umgekehrt wie der Zeiger ein
der Verdränger ist in seiner
Stellung, alle Luft ist in den ober
des Cylinders gedrängt und hier
Der Arbeitskolben ist etwas üb
mittlere Stellung hinaus und bew
nach unten; der Verdränger begin
dem Kreuz m n angetrieben, sein
wärtsbewegung, die Luft ström
unten. Wenn der Verdränger et
seines Hubes gemacht hat, ist der A
kolben in seiner tiefsten Stellung
beginnt die Expansion der unten e
Luft zu wirken und den Kolben
oben zu treiben u. s. w. Der A
kolben bewegt sich im kältesten Te
Cylinders, und die heiße Luft kan
direkt mit ihm in Berührung kom
drückt nur indirekt auf ihn, inden
in dem Kanale zwischen den Kühlm
und unter dem Kolben befindlic
zusammendrückt, so daß diese als el
Zwischenmittel den Druck überträgt.
liegt der Vorzug der Lehmannschen M
vor andern Konstruktionen, da hierd
Dichtung des Arbeitskolbens leic
dauerhaft durch einen einfachen
stulpen mit Talgschmierung bewirkt
kann. Diese Lehmannschen H
maschinen werden in Größen von
2 Pferdestärken Leistung hergestell



986. Ridersche Luftmaschine.

Die geschlossene Heiß
maschine oder Kompress
maschine von Rider, welche A
im Vertikalschnitt zeigt, hat zwei Cy
einen Arbeitscylinder a und einen
pressionscylinder c; beide sind ver
durch das Rohr f, welches einen aus einer großen Anzahl feiner Metallplättchen beste
Regenerator enthält, durch welchen die Luft beim Übertritt aus einem Cylinder in den a
entweder Wärme aufnimmt oder abgibt, je nachdem kalte Luft aus dem Kompressionsc
in den Arbeitscylinder strömt oder heiße Luft in umgekehrter Richtung. Der Cylinder
einen von Wasser durchflossenen Kühlmantel. Der Arbeitscylinder ist mit seinem unterer
in den Ofen eingebaut; es umgibt ihn ein Mantel h, der mit der domförmigen Ausbuc
in den Cylinder hineinragt. In dem Arbeitscylinder bewegt sich der Arbeitskolben d,
Cylinder b der Verdränger und Kompressionskolben c; beide sind sehr lang und pl
förmig gebildet, am oberen Ende der Cylinder sind sie durch Packungen gegen die
Cylinderwand gedichtet. Beide Plunger sind durch eine Pleuelstange mit je einer Kurb
Schwungradwelle verbunden, beide Kurbeln sind um etwas mehr als 90° so gegenei
verstellt, daß der Arbeitskolben um einen halben Hub voreilt.

Aus der höchsten Stellung des Kolbens c geht gleichzeitig mit ihm der Arbeitskolben d nieder, wodurch die Luft in beiden Cylindern komprimiert wird; beide Kolben haben also einen Widerstand zu überwinden, und die Kraft hierzu muß das Schwungrad hergeben. Da der Kolben d um $^1/_2$ Hub eher in seiner tiefsten Stellung ankommt als c, so drückt er die Luft durch das Verbindungsrohr f in den Cylinder b, wobei sie ihre Wärme an den Regenerator abgibt, in dem Cylinder b kühlt sich die Luft und zieht sich zusammen; wenn der Arbeitskolben seine Aufwärtsbewegung beginnt, geht der Verdränger c noch weiter nach unten, die Luft strömt aus dem Cylinder b durch den Regenerator, in dem sie Wärme aufnimmt, durch den ringförmigen Zwischenraum zwischen dem Mantel h und dem unten offenen Arbeitscylinder in letzteren, wird an der hocherhitzten Fläche des Mantels h und des Domes i stark erwärmt, so daß sie den Kolben nach oben drückt. Die hierbei während des Niederganges des Kompressionskolbens und Aufganges des Arbeitskolbens wirksam werdende Arbeit entspricht der Druckdifferenz zwischen Heiß- und Kaltcylinder. Gehen, nachdem der Kompressionskolben seine tiefste Stellung überschritten hat, beide Plunger nach oben, dann leistet der Luftdruck auf beide Arbeit; es wird fortwährend der expandierenden Luft Wärme von der Feuerung zugeführt, die nach dem Cylinder c übertretende Luft gibt aber gleichzeitig Wärme an den Regenerator und an das Kühlwasser ab. e ist ein Hahn, durch dessen Öffnen die Maschine still gestellt werden kann, indem die erwärmte Luft, statt auf den Kolben zu drücken, hier austreten kann; g ist ein Ventil, welches selbstthätig durch den äußeren atmosphärischen Druck so viel Luft als Ersatz in die Maschine treten läßt, als durch Undichtigkeiten in den Kolbendichtungen verloren geht.

Die Leistung der Heißluftmaschine ist auch bei ziemlich großen Dimensionen des Arbeitscylinders nur eine geringe. Mit derselben müßte dem Prinzip nach die Verbrennungswärme besser ausgenutzt werden können, als durch Dampfmaschinen; durch die unvermeidlichen großen Wärmeverluste durch Strahlung und Übertragung auf das Kühlwasser wird indessen die Wirkung der Heißluftmaschinen nicht höher als bei Kleindampfmaschinen. Die Lehmannsche Maschine braucht pro Pferdekraft und Stunde Leistung etwa 4 kg Koks, so daß der Wirkungsgrad etwa 2 bis $2^1/_2$ % beträgt.

Der Vorteil der Heißluftmaschinen für das Kleingewerbe liegt in der Gefahrlosigkeit des Betriebes, weshalb sie ohne polizeiliche Konzession überall aufgestellt werden kann; sie braucht keinen besonderen Kessel und kann leicht nach kurzem Anheizen in Betrieb gesetzt werden. Der Nachteil der Maschine liegt in dem zu hohen Brennmaterialverbrauch, in der, wie wir gesehen haben, etwas komplizierten Konstruktion, sowie den verhältnismäßig großen Dimensionen und daher teuerem Preise für kleine Leistungen. Da die modernen Gas- und Petroleummotoren dieselben Vorzüge haben, wie die Heißluftmaschinen, dabei aber gar keine Feuerung haben, die anzuheizen und zu unterhalten ist, also bequemer im Betrieb sind, so haben diese die Luftmaschinen in neuester Zeit mehr und mehr verdrängt und wahrscheinlich wird diese Gattung kalorischer Maschinen in einiger Zeit aus der Technik und dem Gewerbe ganz verschwinden.

Diesels neuer Wärmemotor.

Wie schon früher ausgeführt, ist der geringe theoretische und wirtschaftliche Wirkungsgrad der Dampfmaschinen in der Verwendung des Wasserdampfes als Kraftträger, also dem Grundprinzip der Dampfmaschine, selbst begründet, indem zuerst mit unvermeidlichem Wärmeverlust im Kessel Wasserdampf erzeugt werden muß, und dann in der Dampfmaschine, von der dem Dampfe aus der Verbrennung der Kohlen übertragenen Energie nur ein kleiner Teil in mechanische Arbeit umgesetzt werden kann.

Im Jahre 1893 gab nun der deutsche Ingenieur Rudolf Diesel eine Broschüre heraus: „Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors“, in welcher er die theoretischen Bedingungen und auch Vorschläge über die praktische Ausgestaltung einer Wärmekraftmaschine nach neuen Prinzipien entwickelte, welche eine wesentliche Verbesserung der bisherigen kalorischen Maschinen darstellen sollten. Die Broschüre machte zwar anfangs wegen der Neuheit und der Richtigkeit der entwickelten Prinzipien in Fachkreisen Aufsehen, aber von praktischen Erfolgen hörte man jahrelang wenig; erst gegen Mitte des Jahres 1897 traten die Bestrebungen Diesels wieder in weiteren Fachkreisen in die Öffentlichkeit, nachdem es ihm gelungen war, in jahrelanger rastloser und unverzagter Arbeit die großen Schwierigkeiten zu überwinden, die zwischen der Erfassung einer richtigen Idee, der Aufstellung des Prinzips für eine neue Maschine und der praktischen Anwendung und Ausnutzung desselben liegen.

Diesel ging von dem Grundgedanken aus, der in den Heißluftmaschinen und Gaskraftmaschinen längst angewendet wurde, die Verbrennung im Kraftcylinder selbst zu bewirken; er hatte aber für diese Verbrennung auf Grund theoretischer thermomechanischer Prinzipien neue Bedingungen gefunden, die eine bessere Ausnutzung der Wärme erwarten ließen. Ohne auf die theoretische Begründung hier einzugehen, sind die von ihm aufgestellten wichtigsten Hauptbedingungen folgende. Bei einem rationellen motorischen Wärmeprozeß soll die Verbrennungstemperatur nicht durch die Verbrennung selbst erzeugt werden, sondern vor und unabhängig von ihr, also noch vor erfolgter Zündung, durch mechanische Kompression reiner Luft; hierzu ist eine Zusammenpressung auf 30 bis 50 Atmosphären erforderlich, wobei die Temperatur bis auf die Entzündungstemperatur des Brennmaterials steigt. Das letztere soll alsdann nicht auf einmal in diese hocherhitzte und komprimierte Luft eingeführt und zur Verbrennung gebracht werden, sondern allmählich, derart, daß die durch die allmählich erfolgende Verbrennung entstehende Wärme sofort durch die gleichzeitig erfolgende Expansion und damit verbundene Kühlung aufgezehrt, d. h. in mechanische Arbeit, den Druck auf den Kolben, umgesetzt wird. Hierbei würde also während der Verbrennungsperiode keine Temperatursteigerung mehr stattfinden. Die Bedingung für eine solche Verbrennung ist natürlich, daß der Brennstoff in entsprechender Form eingeführt werden kann, also staubförmig, flüssig, oder gasförmig sein muß. Schließlich soll nicht, wie es bisher für alle Verbrennungen galt, mit möglichst wenig Luftüberschuß gearbeitet werden, sondern es wird im Gegenteil ein beträchtlicher Luftüberschuß erforderlich.

Auf Grund dieser Prinzipien hatte Diesel mehrere Konstruktionen „rationeller Wärmemotoren", wie er sie nannte, entworfen, die dieselben, soweit es die Praxis gestatte, verwirklichen sollten, von denen besonders eine, für direkte Verbrennung staubförmiger Kohle, bekannt und in Fachkreisen besprochen wurde. Die Konstruktion hatte zwei stehende Verbrennungscylinder, welche mittels gesteuerter Ventile an einen größeren, zwischen ihnen stehenden Mittelcylinder angeschlossen waren; die beiden Verbrennungscylinder arbeiten im Viertakt; auf je vier einfache Hübe kommt ein Krafthub, indem eine gewisse Menge staubförmige Kohle eingeführt und zur Verbrennung gebracht wird. Die Krafthübe beider Cylinder erfolgen abwechselnd. Der Mittelcylinder dient zur Nachexpansion und ist einfachwirkend, indem abwechselnd von beiden Verbrennungscylindern die noch hochgespannten Verbrennungsgase über dem Kolben eingeführt werden und noch Arbeit leisten. Hierbei wird auf der unteren Seite des Kolbens im Mittelcylinder atmosphärische Luft vorkomprimiert und in einen besonderen Behälter gepreßt; aus letzterem gelangt sie durch gesteuerte Ventile abwechselnd in die beiden Verbrennungscylinder, derart, daß sie, ähnlich wie das Gas-Luftgemisch in Gasmotoren beim Kompressionshube, jedesmal in jedem Cylinder bei dem dem Krafthube folgenden Kompressionshube weiter komprimiert wird, und zwar so weit, daß sich in der Endstellung des Kolbens die Temperatur bis zur Entzündungstemperatur des Kohlenstaubes erhöht. Jetzt erfolgt die Einführung des Kohlenstaubes, welcher sich sofort entzündet, worauf durch die Expansivkraft der Verbrennungsgase unter Arbeitsleistung der Kolben herabgedrückt wird.

Es war leicht und unwiderleglich zu beweisen, daß solche Wärmemotoren theoretisch den besten Dampfmaschinen überlegen sein mußten; zunächst fallen durch die direkte Verbrennung im Arbeitscylinder der Dampfkessel und die Dampfleitung mit ihren Verlusten fort, und der thermische Wirkungsgrad wurde als doppelt so groß wie bei den besten und größten Dampfmaschinen berechnet. Dagegen war mit Sicherheit vorauszusehen, daß der mechanische Wirkungsgrad wegen der hohen Kompressionen bedeutend geringer ausfallen würde, und von manchen Seiten wurde aus diesem Grunde, sowie wegen der konstruktiven Schwierigkeiten, besonders wegen der erforderlichen sehr hohen Drucke, die Möglichkeit eines praktischen Erfolges der ganzen Erfindung bezweifelt oder direkt bestritten. Wegen der anerkannten großen theoretischen Vorteile gewann aber Diesel das Interesse hervorragender Fachmänner und bedeutender Industrieller, welche seine Bestrebungen unterstützten. Die renommierte große Maschinenfabrik Augsburg stellte eine mit allen modernen Mitteln der Wissenschaft und Technik ausgestattete Ver-

suchsstation zur Verfügung, und jetzt begann Diesel, unterstützt von tüchtigen Mitarbeitern, mit nicht rastender Energie und Zähigkeit mehrere Jahre dauernde Arbeiten und Versuche, seine Ideen in die Wirklichkeit überzuführen.

Nach mehrfachen Enttäuschungen und fehlgeschlagenen Hoffnungen hat er schließlich einen Erfolg errungen, der in weiteren Fachkreisen großes Aufsehen erregt hat und nach dem Urteile berufener Autoritäten die größte Bedeutung für die weitere Entwickelung der Kraftmaschinen haben kann. Ende 1895 wurde der erste Versuchsmotor von zwölf Pferdestärken, für Verwendung von Petroleum und Leuchtgas als Brennmaterial fertig gestellt, der praktisch brauchbar war und monatelang eine Fabriktransmission betrieb. Diese Versuchsmaschine war in der Gesamtkonstruktion und in den Einzelteilen noch mangelhaft, und auf Grund der bis dahin gewonnenen Erfahrungen wurde endlich ein ganz neuer, einheitlich sorgfältig durchkonstruierter zwanzigpferdiger Motor gebaut, der Anfang 1897 in der Maschinenfabrik Augsburg mit Petroleum in Betrieb gesetzt wurde. Die Maschine war konstruktiv gegen den oben beschriebenen Entwurf durchaus verschieden. Sie hat nur einen senkrechten Arbeitscylinder mit langem Plungerkolben; sie arbeitet wie Gasmotoren im Viertakt. Der Arbeitsvorgang ist folgender: 1) Der Kolben bewegt sich durch die von den vorhergehenden Krafthüben im Schwungrad angesammelte lebendige Kraft abwärts; dabei wird atmosphärische Luft in den Cylinder eingesaugt. 2) Beim Aufgange des Kolbens wird diese Luft komprimiert und zwar auf so hohen Druck, daß die Temperatur bis zur Entzündungstemperatur des Brennmaterials steigt; da diese Temperatur genau bekannt ist, so läßt sich die erforderliche Komprimierung nach den thermomechanischen Gesetzen genau bestimmen. Die Kraft für den zweiten Hub wird auch noch von dem Schwungrad hergegeben. 3) In der Endstellung des Aufwärtshubes wird durch eine kleine, von der Maschine selbst betriebene Pumpe eine bestimmte Menge Petroleum in die komprimierte Luft eingedrückt; dasselbe entzündet sich sofort, und die Verbrennungsgase drücken auf den Kolben. Die Zuführung des Brennmaterials geschieht nicht auf einmal, sondern während eines bestimmten Bruchteiles des Hubes, der Admissionsperiode, ebenso wie die Dampfzuführung bei Expansionsdampfmaschinen. Von dem Ende der Admissionsperiode ab, nachdem das Petroleum verbrannt ist, wirken die Verbrennungsgase weiter durch Expansion. 4) In dem folgenden Hube werden diese Gase ausgeblasen und hierauf wiederholt sich dasselbe Spiel. Die Maschine ist ohne Kühlmantel gelaufen, wodurch die Möglichkeit, ohne Kühlwasser zu arbeiten, die theoretisch vorausgesehen war, bewiesen wurde. Später wurde aber doch aus praktischen Gründen ein Kühlmantel, wie bei Gasmotoren, angebracht, und es zeigte sich, daß der hierdurch bedingte Wärme- und Kraftverlust keineswegs so wichtig ist, wie früher angenommen wurde.

An dieser Maschine wurden alsdann die eingehendsten Versuche vorgenommen, von Professoren des Maschinenbaues ersten Ranges, sowie von hervorragenden Männern der Praxis, Direktoren und Ingenieuren großer Maschinenbauanstalten. Die Ergebnisse dieser Versuche stimmten überein, so daß sie als feststehend und bei der außerordentlichen Sorgfalt als einwandfrei gelten können. Das Resultat war, daß die neue Maschine sämtliche bisherigen Wärmemotoren bezüglich der Wärmeausnutzung übertrifft und hiernach an die Spitze derselben tritt. Der theoretische Wirkungsgrad der Maschine beträgt 50—70 %, wobei erstere Zahl für einfache kleinere, eincylindrige, die letztere für größere Verbundmaschinen gilt; er ist doppelt so groß als bei Dampfmaschinen; in diesem hohen Wirkungsgrad ist die Überlegenheit des Dieselschen Motors gegenüber den Dampfmaschinen und auch den Gaskraftmaschinen und ähnlichen Motoren begründet, bei denen derselbe zwischen 33 und 43 % schwankt. Der Brennmaterialverbrauch beträgt 250 g pro effektive Pferdekraft und Stunde Leistung; der gesamte effektive, also wirtschaftliche Wirkungsgrad ist nach den Versuchen im Mittel 25,7 %; d. h. von der Verbrennungswärme des Brennmaterials werden 25,7 % als nutzbare mechanische Arbeit gewonnen. Dies ist gegenüber anderen Wärmemotoren sehr viel; der gesamte Wirkungsgrad beträgt bei Dampfmaschinen bei größten und besten Ausführungen mit dreifacher Expansion bis 12 oder 13 %, bei mittleren Maschinen bis herab auf 150 oder 200 Pferdestärken bis 9 %, bei Maschinen bis herab auf etwa 50 Pferdestärken mit Kondensation 5 oder 6 %, und noch viel

weniger bei gewöhnlichen kleinen Dampfmaschinen. Allerdings ist kein direkter wirtschaftlicher Vergleich nach dem Wirkungsgrade zulässig, da bei der Dieselschen Maschine als Brennmaterial Petroleum oder Gas verwendet wird, welches für denselben Wärmeeffekt viel teurer ist, als das Betriebsmaterial der Dampfmaschinen, die Steinkohle.

Nach den offiziellen Versuchen sind an dem Augsburger Versuchsmotor noch weitere Verbesserungen vorgenommen worden, wodurch nach Mitteilung des Erfinders Diesel der Petroleumverbrauch auf 215 g pro effektive Pferdekraft und Stunde herabgemindert und die wirtschaftliche Wärmeausnutzung auf 30% erhöht wurde. Weitere Verbesserungen stehen noch bevor, welche die Erreichung eines noch höheren Nutzeffektes erwarten lassen.

Die erwähnten Versuche ergaben noch folgende wichtige Eigenschaften der neuen Maschine. Der Brennmaterialverbrauch steigt bei abnehmender Leistung nur sehr wenig für die Einheit der mechanischen Leistung, während bei den gewöhnlichen Petroleummotoren der Wirkungsgrad bei abnehmender Leistung gegen die normale stark fällt; ferner werden die Dieselschen Motoren für eine bestimmte Leistung viel kleiner als alle übrigen kalorischen Maschinen, natürlich gleiche Umdrehungszahl vorausgesetzt. Schließlich ist eine wesentliche Eigentümlichkeit des Motors, daß die Leistung, genau wie bei Dampfmaschinen, durch Veränderung der Füllung, d. h. der Admissionsperiode des Brennstoffes geregelt werden kann; die Maschine folgt dem Regulator in erstaunlich genauer Weise, wie die bei den Versuchen vorgenommenen Be- und Entlastungen der Maschine bewiesen haben. Hierdurch hat die Maschine die Vorzüge der Dampfmaschinen in Bezug auf Regulierfähigkeit, Ruhe und Regelmäßigkeit des Ganges, gegenüber dem wesentlichen Nachteile der Explosionsmotoren, der stoßweisen Wirkung und unregelmäßigen Regulierung durch Aussetzung der Füllungen.

Dabei hat die Dieselsche Maschine mit den Gasmotoren u. s. w. gegenüber den Dampfmaschinen die wertvolle Eigenschaft der steten Betriebsbereitschaft gemein: kein Kessel, kein Anheizen; nach beliebig langer Betriebsunterbrechung kann der Motor jederzeit sofort angelassen werden. Von Wichtigkeit ist noch, daß der neue Motor beinahe gleich guten Wirkungsgrad hat bei großer und kleiner Ausführung, so daß kein Grund vorliegt, die in einem Fabriketablissement erforderliche Kraft möglichst an einer Stelle in einer Maschine zu erzeugen und durch weitverzweigte Transmission zu übertragen, was beim Dampfmaschinenbetriebe wegen der besseren Ökonomie großer Maschinen, sowie besonders auch wegen der Dampfkessel erstrebt werden muß. Es können statt dessen mehrere Dieselsche Motoren unter Vermeidung langer kostspieliger Transmissionen oder Kraftübertragungen möglichst nahe bei den Verbrauchsstellen aufgestellt werden, ohne der Ökonomie des Betriebes zu schaden. Eine weitere Perspektive eröffnet dieser Umstand bei den Maschinen zur Ortsveränderung, den Lokomotiven. An Stelle der langen schweren Eisenbahnzüge mit großen Lokomotiven könnte eine größere Anzahl kleinerer Motorwagen laufen; besonders auf Nebenbahnen könnte vielleicht der Betrieb in dieser Weise vorteilhaft geändert werden.

Bis jetzt ist die Maschine in erster Linie als Petroleummotor vollständig ausgebildet; aber wie schon früher angedeutet, kann der Betrieb auch mit anderen flüssigen Kohlenwasserstoffen, ferner mit Leuchtgas und besonders auch mit Kraftgas (Generatorgas) erfolgen. Das Endziel ist aber, die Verwertung der Steinkohle zu ermöglichen. Von dem Erfinder sind in Verbindung mit der Maschinenfabrik Augsburg die Vorarbeiten und Versuche in dieser Richtung bereits begonnen.

Nach vorstehenden Darlegungen ist die Erfindung Diesels aus dem Stadium der theoretischen Berechnungen und praktischen Anfangsversuche herausgetreten; wir haben eine neue Wärmekraftmaschine erhalten, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit von größter Bedeutung ist. Eine Anzahl der hervorragendsten größten Maschinenfabriken, darunter die Gasmotorenfabrik Deutz, Friedr. Krupp in Essen, die schon genannte Maschinenfabrik Augsburg haben die Ausführung der Maschinen übernommen. Die Erfindung und Ausbildung der neuen Maschine in wenigen Jahren ist ein Triumph für die Männer, welche ihren großen Erfolg durch die Verbindung gründlicher wissenschaftlicher Forschung mit tüchtigem konstruktiven Können und unermüdlicher Thatkraft errungen haben.

Kraftübertragung und zentrale Kraftversorgung.

Nachdem wir in den vorangegangenen Kapiteln die Maschinen zur Erzeugung von Kraft oder mechanischer Arbeit in ihrer Wirkungsweise und Konstruktion kennen gelernt haben, mögen zum Schluß noch kurz die verschiedenen Mittel und Wege besprochen werden, Kraft oder mechanische Arbeit zu übertragen und von einer Stelle aus auf kleinere oder größere Entfernungen einzelne Stellen oder ganze Gebiete mit mechanischer Energie zu versorgen. Fast bei allen Kraftmaschinen muß zur Ausnutzung der gewonnenen Kraft durch ein Zwischenglied eine Übertragung an die Kraft verbrauchende Arbeitsmaschine stattfinden. In manchen Fällen ist dieses Zwischenglied sehr einfach und kann als ein Teil der Kraftmaschine oder auch der Arbeitsmaschine selbst betrachtet werden; bei dem direkten Antrieb einer Pumpe durch die Kolbenstange einer Dampfmaschine z. B. wird man gewöhnlich von einem Kraftübertragungsmittel gar nicht sprechen. Sobald aber von einer Kraftmaschine aus mehrere Arbeitsmaschinen betrieben werden sollen, haben wir eine Arbeitsübertragung mit bestimmten Organen; die Art der Arbeitsübertragung kann auf sehr verschiedene Weise und in sehr verschiedenem Umfange geschehen.

Ganz allgemein läßt sich bei allen Kraftübertragungsmitteln eine prinzipielle Unterscheidung machen zwischen solchen, die direkt mechanische Arbeit im engeren Sinne übertragen, und solchen, die Energie in einer Form transportieren, welche nicht ohne weiteres zur mechanischen Arbeitsleistung verwendet werden kann, sondern zu diesem Zwecke noch erst umgewandelt werden muß.

Die gewöhnlichste, allgemein verbreitete Arbeitsübertragung zeigt die Transmission einer Fabrik. Die Kraftübertragungsmittel sind hier Riemen und Riemenscheiben, oder Seile und Seilscheiben mit Wellen; die Arbeitsübertragung geschieht durch Zugkräfte mittels Leder- oder Baumwollriemen, Hanf- oder Drahtseilen. An der Wand oder unter der Decke des Fabrikraumes ist mittels einer Anzahl Wand- oder Hängelager die Transmissionswelle gelagert; auf derselben sitzt eine Hauptantriebs-Riemenscheibe genau gegenüber der Antriebsscheibe der auf dem Boden stehenden oder liegenden Betriebsmaschine. Um beide Scheiben herum liegt ein schleifenförmiger endloser Riemen mit einer gewissen, nicht zu großen Spannung. Beim Gange der Maschine wird dieser Riemen durch die Reibung an der Riemenscheibe der Maschine mitgenommen und er nimmt wieder die Riemenscheibe der Transmissionswelle mit, letztere in Rotation versetzend. Von verschiedenen anderen Antriebsscheiben der Welle aus werden die einzelnen Arbeitsmaschinen oder auch vorher noch wieder andere Transmissionen oder Vorgelege betrieben. Letztere werden angewendet, wenn die Drehungsgeschwindigkeit vergrößert oder verringert werden soll. Macht z. B. die Haupttransmission 80 Umdrehungen pro Minute, während eine Anzahl Arbeitsmaschinen mit 400 Touren laufen sollen, dann legt man ein Zwischenvorgelege, z. B. für 160 Umdrehungen ein; hierzu erhält die Antriebsscheibe auf letzterem nur den halben Durchmesser wie die antreibende Scheibe auf der Hauptwelle. Da der umlaufende Treibriemen der angetriebenen Scheibe genau die Umfangsgeschwindigkeit der Antriebsscheibe erteilt, der Durchmesser und damit der Umfang aber nur halb so groß ist, so muß die Umdrehungszahl der Vorgelegewelle doppelt so groß sein als diejenige der Hauptwelle. Weiter wird nun den Antriebsscheiben auf der Vorgelegewelle für die einzelnen Arbeitsmaschinen der $2\frac{1}{2}$ mal so große Durchmesser gegeben, als die Scheiben dieser Maschinen haben; dadurch wird wieder die Drehgeschwindigkeit $2\frac{1}{2}$ mal vergrößert, so daß dieselben $2 \times 2\frac{1}{2} \times 80 = 400$ Umdrehungen pro Minute machen. Umgekehrt kann man natürlich auch die Geschwindigkeit verringern. Wie erwähnt, beruht der Transmissionsbetrieb auf der Reibung zwischen Riemen und Riemenscheibe. Damit dieselbe genügend groß ist, muß der Riemen mit einem gewissen Druck aufliegen, also eine gewisse Spannung haben, und damit letztere ausgehalten werden, muß der Riemen wieder eine genügende Stärke und Breite haben. Zur Vergrößerung der Reibung werden auch wohl die Riemen auf der Auflagerseite mit einer geeigneten, harzigen Masse bestrichen; bei langen oder schnell laufenden Riemen wendet man auch Spannvorrichtungen an. Auf größere Längen als innerhalb eines Fabrikraums, z. B. über einen Hofplatz fort nach einem anderen Gebäude,

wird Drahtseiltransmission angewendet; statt des Leder- oder Baumwollriemen
größere Längen und besonders im Freien nicht gut anwendbar ist, läuft ü
Scheibe, die am Rande eine Rille hat, ein Drahtseil, welches die Bewegung u
Arbeit auf eine zweite, ebensolche Scheibe auf einer Welle überträgt. Durch
wirkt auch eins der ältesten Kraftübertragungsmittel, das Seil zur vertikalen
zontalen Förderung, besonders in Bergwerken. Der Seilbetrieb stellt das einfa
Kraftübertragungssysteme dar, da hierbei direkt die von der Kraftmaschine
Energie ohne irgend eine andere Zwischenmaschine zur Arbeitsleistung nutzba
wird. Das Seil ist seit alten Zeiten besonders für vertikale Hebung von L
hauptsächlich zur Förderung in Bergwerken allgemein im Gebrauch. Auch für h
Förderung wird es angewendet, z. B. in neuerer Zeit in amerikanischen St
Betriebe von Kabel-Straßenbahnen. Ein Beispiel der Kraftübertragung im enge
durch das Seil ist schon früher in der älteren Wasserkraftanlage zu Schaffhausen
worden. Dieses Werk stellt eine der ältesten Kraftübertragungs- und zentral
versorgungsanlagen in größerem Maßstabe dar.

In neuerer Zeit ist man in der Übertragung mechanischer Arbeit und der
Kraftversorgung viel weiter gegangen. Zwei Gesichtspunkte sind für solche Anl
gebend und bilden die Grundlagen für das technische und wirtschaftliche Gelinge
seits die Möglichkeit, unter günstigen Verhältnissen, durch große, mit den b
richtungen versehene Maschinen vorteilhafter Kraft zu erzeugen und durch i
Übertragungssystem an die Verbrauchsstellen zu übertragen, als dies dort m
anderseits der Umstand, daß die Umwandlung und Nutzbarmachung der auf di
übertragenen Energie an den Verwendungsstellen einfacher ist, als der Betrieb l
Kraftmaschinen. Durch große Kraftmaschinen, die an günstig gelegenen Orte
werden, läßt sich eine gewisse Kraft viel vorteilhafter erzeugen, als durch mehre
Kraftmaschinen an bestimmten Stellen, unter gegebenen Bedingungen. Wenn e
Dampfmaschinenanlage an einer Stelle angelegt wird, wo der Grund und Bo
und die Kohlenbeschaffung durch direkte Geleisverbindung mit der Eisenbahn o
Umständen direkten Bezug aus einem Bergwerk möglich ist, so werden die Ge
kosten einer Pferdekraft bedeutend geringer sein, als bei einer kleineren Damp
in einem Betriebe inmitten einer Stadt; noch günstiger wird natürlich das B
wenn eine große und günstige Wasserkraft zur Verfügung steht, welche mit v
mäßig geringen Anlage- und Betriebskosten ausgenutzt werden kann. Es handel
nur noch darum, die auf diese Weise erzeugte Kraft durch solche geeignete Mitt
Verwendungsstellen zu übertragen, daß ihre Benutzung hier vorteilhafter wird
selbständige Erzeugung der Arbeit durch einzelne Kraftmaschinen. Die verschieden
übertragungssysteme, die dieses bezwecken, sind heute noch in einem unentschiedene
begriffen, welches das überlegene ist; jedes System hat seine bestimmten Vo
Nachteile, und nur in jedem einzelnen Falle, bei Abwägung aller Umstände läß
scheiden, welchem der Vorzug zu geben ist, und selbst dann ist oft eine unbedin
und einwandfreie Entscheidung nicht möglich.

Ideen über zentrale Kraftversorgung hatte schon Papin; derselbe wollte W
kraft in die Ferne leiten durch Erzeugung und Erhaltung von Luftverdünnung
Röhrenleitungen. Auch Murdoch, der kongeniale Genosse und Mitarbeiter seines
gewordenen Landsmannes James Watt, hätte sich schon, mit weitem Blick und
Gedanken seiner Zeit vorauseilend, mit dem Problem der Kraftversorgung dur
luft und Luftverdünnung befaßt. Aber erst in neuester Zeit ist das Problem d
übertragung auf weitere Entfernungen und der zentralen Kraftversorgung auf ve
Weisen praktisch gelöst worden.

Zu den wichtigsten Kraftversorgungszentralen im weiteren Sinne geh
städtischen Gasanstalten. Durch dieselben wird zwar nicht mechanische Kraft,
Mittel zur Erzeugung derselben innerhalb der Städte verteilt; das Leuchtgas
beliebiger Stelle durch Gasmotoren zur Erzeugung mechanischer Arbeit verwende
In diesem Sinne stellen in der That die städtischen Gaswerke seit längerer Zeit

noch für die nächste Zukunft das wichtigste zentrale Kraftversorgungssystem für mittlere und kleinere Arbeitsleistungen, also für Mittel- und Kleingewerbe dar; nach genauen Ermittelungen waren im Jahre 1895 in Deutschland rund 25 000 Gasmotoren mit über 100 000 Pferdestärken Leistung in Betrieb; es gibt kein anderes Kraftverteilungssystem, welches eine auch nur annähernd so große Arbeitsmenge durch meist kleinere Motoren leistet. Die Gasanstalten eignen sich sowohl in technischer wie wirtschaftlicher Hinsicht zur zentralen Versorgung mittleren und kleineren Kraftbedarfes vorzüglich. Die Vorteile des Gasmotorenbetriebes für kleine Leistungen und besondere Umstände sind schon früher näher dargelegt worden; aber auch die Verteilung des Kraftmittels, des Leuchtgases durch Rohrleitungen von einer Stelle aus über ein großes Revier ist sehr einfach, technisch vollkommen und sehr leistungsfähig. Die Fortleitung des Gases, also Übertragung der Kraft ist mit sehr geringen Verlusten auf sehr große Entfernungen möglich. Die beiden großen, 85 cm weiten Hauptrohre von der neuen Berliner Gasanstalt zu Schmargendorf können stündlich 18 000 cbm Gas auf $4\frac{1}{2}$ km Entfernung fortleiten; hiermit würden durch Motoren etwa 25 000 Pferdestärken geleistet werden können. Für die Fortleitung dieser Gasmenge auf die genannte Entfernung ist ein Druck von $\frac{1}{40}$ Atmosphäre erforderlich, der durch Maschinen von fünf Pferdekräften erzeugt wird; durch die Übertragung geht also nur etwa $\frac{1}{5000}$ der Energie verloren. Noch bedeutend größer ist die Leistungsfähigkeit der beiden 1,2 m weiten Hauptleitungen der Londoner Gasanstalt in Beckton; dieselben vermögen stündlich 85 000 cbm Gas auf 13 km Entfernung nach London zu führen, womit durch Motoren 120 000 Pferdestärken erzeugt werden könnten.

Auch die städtischen Wasserwerke können der Kraftverteilung dienen, doch haben sie in dieser Hinsicht im allgemeinen nur geringe Bedeutung. Das Druckwasser aus der Leitung kann durch Wassermotoren zur Arbeitserzeugung benutzt werden. Es gibt verschiedene Maschinen für diesen Zweck, von denen einige früher schon besprochen worden sind; bei dem gewöhnlichen Drucke in den städtischen Wasserleitungen, von 3—6 Atmosphären wird aber für die meisten Zwecke die hiermit erzeugte Kraft zu teuer, indem die in dem Betriebsmittel enthaltene Energie im Verhältnisse zum Preise desselben zu klein ist. Die Energie ist, wie früher allgemein für Wasserkraftmaschinen dargelegt, gleich dem Produkt aus dem Gewichte (oder Menge) des Wassers und seiner Druckhöhe; 1 cbm Wasser von vier Atmosphären Spannung = 40 m Druckhöhe enthält also $1000 \times 40 = 40\,000$ Sekundenmeterkilogramm Arbeit, oder auf die Stunde berechnet $\frac{40\,000}{60 \cdot 60 \cdot 75} = 0{,}15$ Pferdekräfte Arbeitsfähigkeit, wovon vielleicht 0,10 Pferdestärken gewonnen werden können, so daß für eine Pferdekraft-Leistung stündlich 10 cbm Wasser gebraucht werden. Das ist natürlich im allgemeinen für mechanische Arbeit viel zu teuer, und nur in besonderen Fällen für ganz kleine Leistungen, die überdies nur zeitweise auf kurze Dauer gebraucht werden, können deshalb Wassermotoren im Anschluß an städtische Wasserleitungen Anwendung finden; sie haben allerdings für solche Zwecke den Vorzug größter Bequemlichkeit, Reinlichkeit und Gefahrlosigkeit. Im großen und ganzen aber haben die gewöhnlichen städtischen Wasserwerke für die Kraftversorgung keine Bedeutung. Dieselben sind von vornherein für diesen Zweck nicht eingerichtet; es wird nicht angestrebt, dem Wasser eine möglichst große Energie für die Kraftübertragung zu erteilen; die Gewinnung und Reinigung des Wassers in der Zentrale, dem Wasserwerk, beansprucht von vornherein einen großen Anteil der Kosten des Wassers; erst durch die Pressung desselben auf einen gewissen Druck — durch Förderung in hochgelegene Reservoire oder Pressen in Windkessel — wird ihm auch eine gewisse, aber verhältnismäßig kleine Energie erteilt, die ausgenutzt werden kann, wobei aber der für die motorischen Zwecke nutzlose Kostenanteil für Gewinnung und Reinigung mit bezahlt werden muß.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse bei Kraftwasserversorgungen. Bei diesen dient das Wasser nur oder in erster Linie als Kraftübertragungsmittel, und die Anlagen werden von diesem Gesichtspunkte aus auf ganz anderer Grundlage errichtet; das Wasser braucht nicht den Ansprüchen an Reinheit, wie das Trinkwasser zu entsprechen;

es genügt, wenn es mechanisch rein ist; es kann also aus irgend einem See oder Fluß entnommen und ohne Reinigung verwendet werden. Um mit einer bestimmten Wassermenge eine möglichst hohe Kraftleistung zu erzielen, wird das Wasser auf einen möglichst hohen Druck, bis zu 100 Atmosphären gebracht. Solche Druckwasseranlagen zur Kraftversorgung sind in neuerer Zeit mehrfach in großem Maßstabe ausgeführt worden. Das großartigste Beispiel bieten die mustergültigen Wasserwerksanlagen der Stadt Genf. Dieselben nutzen die Wasserkraft der Rhone aus, wobei gleichzeitig der Wasserstand des Genfer Sees reguliert wird; die Wassermenge der Rhone beträgt 70 Sekundenkubikmeter bei Niedrigwasser, im Winter bis zu 700 Kubikmeter bei hohem Wasserstande. Zur Aufnahme der Wasserkraft wurde 1883 bis 1886 eine Kraftzentrale errichtet, in welcher durch Turbinen Druckpumpen betrieben werden; dieselben fördern zum Teil Wasser für den gewöhnlichen Hausbedarf in einen Niederdruckbehälter auf 50 m Höhe, zum Teil Wasser zur Kraftversorgung in einen 120 m hoch gelegenen Hochdruckbehälter; von diesem aus verteilt sich eine Kraftwasserleitung durch die ganze Stadt, an welche eine große Anzahl Wassermotoren angeschlossen sind. Der Erfolg dieses Werkes ist ein ausgezeichneter; da die Beschaffung des Wassers, sowie auch der Betrieb der Kraftstation unter günstigen Verhältnissen geschieht, so kann das Kraftwasser billig abgegeben werden, und durch die Beschaffung billiger und bequemer Kraft haben Industrie und Gewerbe bedeutend gewonnen. — Eine andere bedeutende Druckwasser-Kraftzentrale besteht in Zürich.

Eine besondere Anwendung des Druckwassers zur Kraftübertragung findet bei den hydraulischen Kränen und Hebezeugen statt. Anlagen solcher Art sind in den achtziger und neunziger Jahren vielfach in großen Bahnhöfen, Fabriken, sowie besonders in Häfen ausgeführt worden, in Deutschland in großem Maßstabe besonders in Hamburg und Bremen. In einer Kraftzentrale wird durch Dampfmaschinen und Hochdruckpumpen Wasser auf sehr hohe Pressung gebracht, auf 50—100 Atmosphären Druck; dieses Preßwasser wird durch Rohrleitungen nach den Verbrauchsstellen verteilt, wo es die hydraulischen Kräne und Aufzüge betreibt. In der Kraftzentrale oder auch in Zwischen- und Endstationen sind an die Druckwasserleitung Akkumulatoren angeschlossen; dieselben ersetzen die Hochreservoire der gewöhnlichen Wasserwerke. Um nämlich die unvermeidlichen Schwankungen zwischen dem in regelmäßigem Gange von den Maschinen gepumpten und dem nicht ebenso regelmäßig verbrauchten Wasser auszugleichen, kann das Wasser nicht in einen Hochbehälter gedrückt werden; ein solcher würde bei dem erwähnten Betriebsdruck 500 bis 1000 m hoch sein müssen. Statt dessen werden eiserne Cylinder eingeschaltet, in denen sich Kolben dicht bewegen, die mit großen Gewichten belastet sind. Liefert nun die Hochdruckpumpe mehr Wasser, als momentan verbraucht wird, dann steigt dasselbe in den Akkumulator und drückt den Kolben mit dem Gewichte in die Höhe; wird umgekehrt mehr Wasser verbraucht als gepumpt, dann drückt der Akkumulator Wasser in die Leitung.

Ein in Deutschland in größerem Maßstabe, d. h. für größeren Umfang als die verschiedenen Teile eines Etablissements kaum, in den nordamerikanischen Städten dagegen viel angewendetes Kraftversorgungssystem ist die Verteilung von gespanntem Wasserdampf zum Betriebe von Dampfmaschinen. Bei Dampfkraft-Einzelanlagen ist es weniger die Dampfmaschine selbst, als der Dampfkessel, der in der Aufstellung viel Platz einnimmt, im Betrieb umständlich und durch gesetzliche Bestimmungen innerhalb der Städte in bewohnten Häusern erschwert ist; um die einzelnen Dampfkessel überflüssig zu machen, werden deshalb Dampfzentralen mit einer größeren Anzahl Dampfkessel errichtet, und von hier aus wird in gut isolierten Rohrleitungen innerhalb gewisser Reviere der Dampf verteilt. Die Hauptdampfzentrale in New York hat z. B. in vier Stockwerken übereinanderliegend 56 Dampfkessel. Vom technischen Standpunkte aus ist die Dampfverteilung unvorteilhaft, da selbst bei bester Dichtung und sorgfältiger Isolation der Rohrleitungen beträchtliche Verluste durch Kondensation und Spannungsabfall unvermeidlich sind; sie ist deshalb nur für besondere Verhältnisse, für dichtbebaute Reviere kleineren Umfangs mit großem Dampfbedarf und sehr hohen Bodenpreisen wirtschaftlich möglich.

In technischer Hinsicht sehr vollkommen ist dagegen zentrale Kraftversorgung durch **Druckluft**, ein neueres System, welches in großartigem Maßstabe zuerst seit Anfang der neunziger Jahre durch den Österreicher **Popp** in Paris zur Anwendung gekommen ist. Das Prinzip dieses Systems ist folgendes. In einer an günstig gelegenem Orte errichteten Kraftzentrale mit großen Dampfkesseln und Dampfmaschinen bester Konstruktion werden Luftkompressoren betrieben; die Luft wird mit 6—7 Atmosphären Spannung in große Zwischenbehälter, Windkessel, gedrückt und geht von diesen durch Rohrleitungen nach den Konsumstellen, wo sie Druckluftmotoren betreiben. Diese sind ähnlich angeordnet, wie Dampfmaschinen; die Druckluft wirkt in einem Cylinder auf einen Kolben; das Wirkungsprinzip ist indessen ein wesentlich anderes, da ganz andere thermodynamische Vorgänge stattfinden. Man kann zwar auch Maschinen, die nach den Dampfmaschinen ursprünglich konstruiert sind, ja selbst gewöhnliche Dampfmaschinen mit Druckluft betreiben, doch wird der Wirkungsgrad hierbei sehr ungünstig.

Die Kraftverteilung durch Druckluft ist technisch recht vollkommen. Durch die Fortleitung der gepreßten Luft in den Leitungen findet selbst auf große Entfernungen nur ein geringer Kraftverlust statt, die Erzeugung und Verwendung der Druckluft geschieht durch die neueren Maschinen mit einem hohen Wirkungsgrad, der Betrieb sowohl der Maschinen der Zentralstation wie der Motoren ist einfach und sicher; ob aber auch in wirtschaftlicher Beziehung die Kraftversorgung durch das Druckluftsystem vorteilhaft möglich ist, erscheint zweifelhaft und wird von mancher Seite ebenso entschieden bestritten, wie von den Anhängern dieses Systems verteidigt. Die Elektriker behaupten, daß die elektrische Kraftübertragung derjenigen durch Druckluft unbedingt und in jeder Hinsicht überlegen sei, und die Gasfachmänner rechnen aus, daß bei den in Deutschland in den meisten Städten bestehenden Gaspreisen für Gewerbebetrieb die von Gasmotoren erzeugte Kraft billiger sei, als eine Druckluftzentrale wegen der hohen Anlagekosten und der hierdurch bedingten großen Zinsen- und Amortisationslast sie liefern könne. Bis jetzt haben sich diese Gegensätze zwar noch nicht geklärt, aber der praktische Erfolg scheint sich in der That nicht dem Druckluftsystem zuzuwenden. Die große Pariser Anlage, die allerdings auch in der technischen Anlage ziemlich unvollkommen ist, kann nicht recht gedeihen, und in Deutschland hat dieselbe keine Nachahmung im großen Maßstabe gefunden. Zwar besteht seit 1891 eine kleinere Druckluftzentrale in Offenbach, welche in technischer Beziehung der großen Pariser weit überlegen ist; für große Städte sind aber zwar seit Jahren mehrere Projekte aufgestellt, aber keine Anlagen ausgeführt worden.

Bedeutend mehr Erfolge hat in unserem Jahrzehnt die Kraftübertragung durch den **elektrischen Strom**, das jüngste Kind der Technik, gehabt. Eine Zeitlang, besonders Anfangs der neunziger Jahre, gingen die Erwartungen, welche an die elektrische Kraftversorgung geknüpft wurden, weit über das Ziel hinaus; jetzt ist indessen die überschwengliche, kritiklose Begeisterung, welche eine vollständige Umwälzung in der ganzen Kraftversorgung für Industrie und Gewerbe in kürzester Zeit für zweifellos erklärte, ebenso groß, wie sie durch Watts Dampfmaschine eingeleitet wurde, längst in die Grenzen der zielbewußten, ruhigen Entwickelung zurückgetreten. Den Anstoß zu den übertriebenen Erwartungen hat besonders der in technischer Hinsicht in der That großartige Erfolg der auf der ganzen Welt berühmt gewordenen Kraftübertragung Lauffen-Frankfurt bei der Elektrotechnischen Ausstellung zu Frankfurt a. M. 1891 gegeben. Von der früher schon erwähnten Turbinenanlage der Portlandzementfabrik Lauffen wurde die Kraft einer Turbine von 300 Pferdestärken durch elektrische Leitung nach dem 175 km entfernten Frankfurt übertragen und zwar mit dem sehr hohen Gesamtnutzeffekt von 75 %; in der Ausstellung in Frankfurt wurden durch die aus dem Neckarfalle bei Lauffen gewonnene Energie etwa 1000 elektrische Glühlampen gespeist und außerdem ein Pumpwerk betrieben, welches Wasser auf 10 m Höhe pumpte, von wo es in einem Wasserfall herabfiel; der 175 km entfernte Wasserfall wurde also durch seine eigene Kraft hier in kleinerem Maßstabe von neuem produziert. Die Fernleitung geschah durch blanke Kupferdrähte auf Gestängen, also oberirdisch. Dieser großartige, in technischer Hinsicht vollkommen gelungene Versuch erregte mit Recht ungeheueres Aufsehen. Der Erfolg war aber in erster Linie zunächst

nur ein technischer, kein wirtschaftlicher; denn durch die sehr bedeutenden Anlagekosten wäre trotz des hohen Nutzeffektes die übertragene Arbeit in Frankfurt für jede wirtschaftliche Ausnutzung zu teuer gewesen. Wenn zu den thatsächlichen Kosten dieser Anlage diejenigen für die Wasserkraft, die Gewinnung und Fernleitung des elektrischen Stromes für eine industrielle Unternehmung zugerechnet werden, so könnte man nach Professor Riedler, selbst wenn die Übertragung ohne Verlust durch die mehrmalige Umwandlung und Fernleitung möglich wäre, in Frankfurt also die volle in Lauffen erzeugte Arbeit von 300 Pferdestärken zur Verwendung kommen würde, für die Gesamtsumme in Frankfurt selbst nicht nur eine vorzügliche komplette 300pferdige Dampfmaschinenanlage errichten, sondern auch noch das Betriebskapital hierfür und ein Vermögen außerdem ersparen. Dieses Beispiel soll keineswegs die hohe Bedeutung der elektrischen Kraftübertragung herabsetzen, sondern nur zeigen, daß man sich nicht von dem glänzenden technischen Erfolg eines gelungenen Experimentes blenden lassen darf, wie dies so leicht und oft geschieht; in letzter Linie entscheidet doch stets der wirtschaftliche Erfolg, und dieser hängt nicht allein, oft sogar in geringem Maße von dem technischen Wirkungsgrade einer Anlage ab.

Das Prinzip der elektrischen Kraftübertragung ist im Grunde dasselbe, wie bei jeder anderen Energieübertragung, nur ist es nicht so ohne weiteres klar, da das Übertragungsmittel, der elektrische Strom, nicht, wie das Seil, der Dampf, das Wasser oder das Gas, unseren Begriffen direkt zugänglich ist. Es wird allgemein durch irgend eine Kraftmaschine mittels Elektrodynamomaschinen elektrische Energie erzeugt. Dieselbe wird durch ein geeignetes Leitungssystem fortgeleitet und an der Verwendungsstelle durch Sekundärmaschinen, die Elektromotoren, wieder in mechanische Arbeit umgewandelt. Für die elektrische Übertragung ist in erster Linie das Leitungssystem wichtig; es kann sowohl Gleichstrom wie Wechselstrom verwendet werden. Bei kleineren Entfernungen hat der Gleichstrom den Vorteil, daß die durch ihn betriebenen Motoren leichter in Gang zu setzen sind; Wechselstrom hat dagegen für größere Entfernungen den sehr wichtigen Vorzug, der ihn in wirtschaftlicher Beziehung überlegen macht, daß man mit sehr hoher Spannung arbeiten kann, wodurch die Verluste in der Fernleitung und die Kosten der letzteren bedeutend geringer werden. Hauptsächlich durch diese ist die Grenze der wirtschaftlichen Möglichkeit der elektrischen Kraftübertragung bestimmt. Bei der Kraftübertragung Lauffen-Frankfurt wurde zum erstenmal in großem Maßstabe ein neues Stromsystem, der Drehstrom, oder Dreiphasenstrom vorgeführt, eine besondere Art Wechselstrom, welcher gewisse wichtige Vorzüge besitzt, hauptsächlich den, daß Drehstrommotoren von selbst anlaufen, was bei den gewöhnlichen Wechselstrommotoren nicht der Fall ist. Bei der Fernleitung wurde mit Spannungen von 10000—15000 Volt gearbeitet und nur besondere Umstände — die nicht rechtzeitige Fertigstellung der besonders für diesen Zweck konstruierten 9000 Ölisolatoren — machten die Anwendung einer Stromspannung bis zu 30000 Volt unmöglich.

Die größten elektrischen Kraftübertragungswerke sind die früher beschriebenen Wasserkraftwerke zu Rheinfelden, welche voraussichtlich in kurzer Zeit ihrer Vollendung entgegengehen, und die seit 1897 teilweise fertiggestellten großartigen Niagara-Kraftwerke in Nordamerika.

In technischer Beziehung ist die Kraftübertragung und zentrale Kraftverteilung durch den elektrischen Strom zweifellos das vollkommenste aller Systeme; die Fernleitung selbst geschieht durch ein paar Drähte ohne bewegliche Teile, die keiner Wartung bedürfen, keiner Abnützung unterworfen sind, sehr geringen Raum beanspruchen und fast überall angebracht werden können; die Elektromotoren sind bezüglich der leichten Aufstellbarkeit und Bequemlichkeit im Betriebe allen übrigen Motoren überlegen. Trotzdem hat die Kraftversorgung aus städtischen Elektrizitätswerken noch keinen beträchtlichen Umfang gewinnen können, weil im allgemeinen die Kosten für Erzeugung und Verteilung zu groß sind, um Elektromotoren für nennenswerte Arbeitsleistungen verwenden zu können. In gewissen Fällen z. B. in Fabriken, in denen eine große Anzahl Arbeitsmaschinen mit geringem Kraftbedarf betrieben werden, wie in mechanischen Werkstätten, in der Feinmechanik,

in Webereien, Buchdruckereien u. s. w. bietet der elektrische Betrieb so große Vorzüge, daß unter besonderen Umständen die Mehrkosten der Arbeitserzeugung gegenüber gewöhnlichem Transmissionsbetrieb ausgeglichen werden können. Immerhin ist bisher die Kraftentnahme aus städtischen elektrischen Zentralen nur eine geringe. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei Elektrizitätswerken, die nicht, wie die städtischen Lichtzentralen, vorwiegend zur elektrischen Beleuchtung angelegt sind, bei denen vielmehr von vornherein die Kraftverteilung in erster Linie mit in Rücksicht gezogen ist. Solche Werke finden besonders dort die Grundlage für wirtschaftliches Gedeihen, wo einerseits die sonst die Industrie beherrschende Krafterzeugung durch Dampfmaschinen wegen Mangels an Kohle und ungünstiger Transportverhältnisse für dieselbe teuer ist, anderseits günstige Wasserkräfte ausgenutzt werden können, wie dies bei den Kraftverteilungswerken Rheinfelden der Fall ist. Eine derartige Anlage ist das seit kurzer Zeit in vollem Betriebe befindliche Elektrizitätswerk „La Goule“ in der Schweiz; für die Kraftgewinnung wird die Wasserkraft des Doubs, eines Flüßchens in der Nähe der französischen Grenze, bei La Goule, mit 15 Sekundenkubikmeter Wasser bei 26 m Gefälle ausgenutzt. Aus demselben werden durch drei Turbinen zunächst 1500 Pferdestärken gewonnen, während die Anlage bei vollem Ausbau auf 4000 Pferdestärken Leistung berechnet ist. Die gewonnene Kraft wird durch Wechselstrom auf ein Revier von 25 km Radius verteilt mit einer Stromspannung von 5000 Volt; in den einzelnen versorgten Ortschaften wird der Hochspannungsstrom durch Transformatoren auf die niedrige Gebrauchsspannung zur Lichtversorgung und zum Kraftbetriebe umgeformt. Es werden 11 schweizerische Ortschaften des Berner Jura und 6 französische Gemeinden von der Zentrale aus mit Licht und Kraft versorgt.

Im allgemeinen kann man bei dem heutigen Stande der Technik sagen, daß die elektrische zentrale Kraftversorgung nur unter besonderen günstigen Bedingungen mit wirtschaftlichem Erfolg möglich ist. Gerade für die Kraftverteilung in den Städten wäre es von großem Wert, die selbständigen Kraftmaschinen, besonders die Dampfmaschinen mit ihren gefahrbringenden Kesseln und rauchenden Schornsteinen zu verdrängen, doch ist zur Zeit und nach aller Voraussicht auch für die nächste Zukunft hierzu nur geringe Aussicht vorhanden.

Bei einem Vergleich der verschiedenen Kraftübertragungs- und Kraftverteilungssysteme ist die Erwägung folgender Punkte maßgebend. Das Wesen jeder Kraftübertragung liegt erstens in der Erzeugung der Kraft, zweitens in der Umformung der gewonnenen Arbeit in eine für die Fortleitung und spätere Wiederumwandlung in mechanische Arbeit geeignete Energieform, und drittens in der Fortleitung und Verteilung dieser Energie. Alle drei Faktoren kommen für den wirtschaftlichen Wert einer Kraftübertragung in Frage; entscheidende Bedeutung hat in vielen Fällen in erster Linie der letzte Faktor, das für die Übertragung gewählte Kraftmittel, mit dessen Eigenschaften gewisse Vorteile und Nachteile verknüpft sind, und es handelt sich darum, dasjenige Kraftübertragungsmittel zu wählen, dessen besondere Eigenschaften sich am besten den örtlichen Verhältnissen und Bedingungen des gegebenen Falles anpassen. Ein allgemein bestes und vorteilhaftes System der Kraftübertragung und Kraftverteilung für alle Fälle kann es hiernach nicht geben; alle Systeme haben für bestimmte Verhältnisse ihre Berechtigung. Im allgemeinen aber kann gesagt werden, daß kein Kraftübertragungssystem in nächster Zeit die direkt erzeugte Dampfkraft verdrängen wird; unser erstes und wichtiges Krafterzeugungsmittel ist die Kohle, welche alle übrigen benutzbaren Kraftquellen und die ganze Industrie beherrscht.

Namen- und Sachregister.

A = Abbildung, T = Tafel, die Ziffern bedeuten die Seitenzahlen.



General Octavio Piccolomini.
Nach einem Gemälde von Franz Leux im Nationalmuseum zu Stockholm.





